

2. A városklíma jellegzetességei és hatásai

2.1. Bevezetés

A harmadik évezred elején a városok robbanásszerű növekedésének eredményeként a Föld népességének közel fele – hozzávetőleg 3 milliárd fő – él városokban. Az urbanizáció gyorsulása a vele járó környezeti problémák felerősödését is kiváltotta. A városi lakosság gyarapodásával egyre nagyobb számú népességet érintenek közvetlenül a kedvezőtlen környezeti hatások. Közöttük fontos helyet foglalnak el a meteorológiai, éghajlati következmények. Alapvető jelentőségű a felszín fizikai jellemzőinek és a levegő összetételének megváltozása a beépített területeken, amelyek legszembetűnőbb hatása a levegőminőség romlása, ezenkívül azonban szinte az összes meteorológiai elem megváltozik kisebb-nagyobb mértékben a külterülethez képest. A városklíma kifejezés összefoglalóan azt fejezi ki, hogy a települések beépített területén sajátos helyi klíma, azaz a város környéki területekétől eltérő éghajlat jön létre. A városklíma jelenségei közül e munka keretében az egyik fontos éghajlat-módosulással, a városok területén a környező beépítetlen felszínekhez viszonyítva kialakuló hőmérsékleti többlet, az úgynevezett városi hősziget (urban heat island – UHI) vizsgálatával foglalkozunk.

2.2. A városklíma kutatásának rövid története, a téma szakirodalmának áttekintése

Már az ókorban felfigyeltek arra, hogy a város levegője eltér a vidéki levegőtől. Az orvostudomány atyjaként tisztelt kósi Hippokratész (i. e. 5. sz.) is utalt erre, feltételezve, hogy a város levegője káros az egészségre. Quintus Horatius Flaccus (Kr. e. 65–68 táján) ódáiban kárhoztatja Róma füstös levegőjét. Lucius Annaeus Seneca (kb. Kr. e. 3 – Kr. u. 65) szemléletesen fogalmazza meg: „Amint elhagytam Róma füstöl-gő kéményeinek bűzét, melyek, ha fűtöttek, okádták magukból a dögvészes párákat és kormot, megváltozott a hangulatom.”

A római szenátus 2000 évvel ezelőtt törvényt alkotott, amely szerint „A levegőt szennyezni nem szabad”, azaz „Aerem corrumpere non licet”. A Justinianus császár uralkodása idején, i. sz. 535-ben hozott intézkedések jogi képzésre szánt akkori tankönyvben is megtalálhatók. A „Dolgok törvénye” című fejezet világosan tartalmazza az ember levegőhöz való jogát: „A természet törvénye által ezek a jogok – a levegőhöz, a folyóvízhez, a tengerhez s következésképp a tengerpartokhoz való jogok azonosak

mindenki számára.” (Lib. II, Tit. I : Et quidem naturali iure communia sunt omnium haec: aer et aqua profluens et mare et per hoc litora maris) [2.1].

A középkor és újkor során Londonban, a legerősebben urbanizált európai városban a levegő szennyezettsége gyakran olyan mértéket ért el, hogy be kellett tiltani a faszén égetését, amint az 1273-ban is történt. A korabeli levegőminőségi helyzet súlyosságát az is mutatja, hogy 1306-ban, *I. Edward király* (1239–1307) *megtiltotta a faszéntüzelést a kemencékben*. *I. Erzsébet* (1533–1603) hasonló tilalmat rendelt el a parlament ülésének idejére. A faszénről kőszénre történő váltás után a levegőminőségi helyzet tovább romlott Londonban. Feljegyzések szerint a 18. században a London feletti szennyezett légréteg gyakorta már 20–30 mérföld távolságból látható volt [2.2].

Londonnak a köddel kapcsolatos hírneve a német utazóktól származik, a 17. század végéről. A látogatók először csalódtak, amikor a köd megakadályozta őket abban, hogy élvezhessék a főváros látképét. A 19. században viszont sokan még inkább csalódtak akkor, amikor nem találkoztak London eme „nevezetességével”. 1888-ban James Russell Lowell költő, aki az USA minisztereként Angliába látogatott, a következőket írta:

Miss Sedgwick részére
Radnor Place, 2.

1888. október 3.

A ködös évszakunk elején vagyunk, ma épp sárga ködünk van, ami mindig felderít engem, oly szellemesen átváltoztatja a dolgokat. Van benne valami rejtélyes, ami hízeleg az ember önbecsülésének, ami lehetővé teszi, hogy ahhoz a kivételes réteghez tartozunk, amely megteheti, hogy a magány aranypalástjába burkolózzon. És egyúttal nagyon festői látvány. Még a konflisokat is arany glória szegélyezi, és az emberek az utcán mind olyanok, mintha fakuló freskók képeiről léptek volna elénk. Még a szürke, sőt a fekete köd is új és ismeretlen világ, ami vonzza a halandót, aki megunta a megszokott tájakat. [2.2]

A 17. század végén, a 18. század első felében jelentek meg és terjedtek el az első szabványosított meteorológiai mérőműszerek. A 18. század végén a Pfalzi fejedelem nagy támogatója volt a természettudományos kutatásnak. Az ő segítségével jött létre *Európa első egységes elvek és eszközök alkalmazásával működő meteorológiai hálózata* is – a *Societas Meteorologica Palatina*. Nem véletlen tehát, hogy a műszeres városklímamérések is a pfalzi fejedelemség székhelyén indultak el. 1783-ban *Deuer, Mannheimben egy hideg téli éjjelen 6 °C-os hőmérsékleti különbséget észlelt a külváros és a fejedelmi botanikus kert között*.

1818-ban jelent meg *Luke Howard* városok éghajlatával foglalkozó könyve [2.3]. Howard kémikus volt, azonban sokat foglalkozott meteorológiával, egyebek közt *London éghajlatát és a légszennyezettséget is vizsgálta*. Ő használta először a „városi köd” kifejezést is. Howard nevéhez fűződik annak felismerése, hogy a beépített városi területen *melegebb van, mint a külterületeken*. Bár még nem használta ezt a kifejezést, ő fedezte fel a városi hősziget jelenségét. 1820-ban méréssorozattal is alátámasztotta megfigyeléseit. Megállapította, hogy London belvárosa átlagosan 3,7 °C-kal melegebb a vidékéknél. Ezt még, mint utána sokan, a *fűtőanyagok elégetésével magyarázta* [2.4].

A városklíma (stadtklima) kifejezést a beépített területek éghajlat-módosító hatásának leírására a német *Stifter* alkalmazta először 1843-ban [2.5].

A francia *Emilien Renou* 1862-ben végzett méréseket Párizsban. Igazolta Howard megfigyeléseit a városi hőszigetre vonatkozóan. Nem fogalmazza meg egyértelműen, de megfigyeléseinek dokumentációi arra utalnak, hogy a városban tapasztalható magasabb hőmérsékleteket ő már összefüggésbe hozta a levegőminőség és a sugárzási mérleg eltéréseivel. Először ő figyelte fel a szélesebbesség csökkenésére a városban [2.6].

A 20. században a kutatás a városklíma újabb és újabb aspektusait tárta fel. 1908-ban a német *Kremser* berlini vizsgálatai során először írta le a légnedvesség, a szélirány és szélesebbesség módosulásait a városban [2.7].

August Schmauss a városok csapadékmennyiségre gyakorolt hatását vizsgálta Münchenben. Mérései során megállapította, hogy a városban több a csapadék [2.8].

1927-ben az osztrák *Wilhelm Schmidt* forradalmasította a városklíma-kutatást azal, hogy autóra szerelt mérőműszereivel először a világon mobil klímaméréseket végzett Bécs városában. A város különböző beépítettségű részein gyűjtött és a városkörnyéki állomások által mért adatok alapján jellemezte az osztrák fővárosban kialakuló városi hőszigetet [2.9]. Hagyományteremtő módszere még napjainkban is használatos.

1937-ben a Benedek-rendi szerzetes, a német *Albert Kratzer* írta meg az első komoly összefoglaló művet a témában, amiért a „városklimatológia atyjának” nevezik [2.10]. 1937-ben Kratzer még 225 munkát sorolt fel könyve zárásaként, ám az 1956-os második kiadásban már 533 cím szerepelt. *Chandler* 1970-ben, a WMO számára készített egy átfogó bibliográfiát a városklíma témájában. Művében 1800 munkát említ *Chandler* [2.11].

A második világháború után a kutatások szerteágazóbbakká váltak, az industrializáció kedvezőtlen hatásai rávilágítottak a légköri aeroszolk és egyéb szennyezők szerepére a városklíma alakulásában. Megjelentek a repülőgépes, helikopteres mérések, majd elérkezett a rádiószondázás, végül a műholdas megfigyelések ideje. Népes szakembergárdát és komoly technikai apparátust igénylő komplex városklíma-kutatások jellemzik korunkat. Jó példa erre az USA-ban, St. Louis városában lefolytatott METROMEX projekt, mely a nagyvárosi területek klimatikus viszonyainak összefoglaló tanulmánya volt. Hatalmas mérési adatsorok halmozódtak fel; az *Applied Meteorology* című hetilap összes számát ezek kiértékelésének szentelték, az 1970-es évek második felében.

A kutatások szerteágazóvá válása sajátos területeket hozott létre a városklíma kutatási területén belül. Szepesi-Schirokné, Makra és munkatársai, Sansone és csoportja, Weber a városklíma és levegőminőség kapcsolatát, a légszennyező anyagok városi térben történő terjedését vizsgálja [2.12] [2.13] [2.14] [2.15] [2.16] [2.17] [2.18] [2.19].

Az utóbbi évtizedekben egyre inkább a meteorológiai paraméterek vertikális változásainak vizsgálata, illetve a városi felszín energia- és hőtranszport-folyamatainak tanulmányozása vált a kutatás másik fontos területévé amint azt Adegoke és munkatársai, Arnfield, Krayenhoff és Voogt eredményei is mutatják [2.20] [2.21] [2.22]. A városi hősziget és a beépített felszínnek által módosított szélmező kutatása terén Lopes, Weber és Kutler, illetve Shiguang és kollégái által végzett vizsgálatok érdemelnek említést [2.23] [2.24] [2.25].

Napjaink legújabb eredményei az előző kutatási témákból indulnak ki. Fontos új fejlemény a távérzékelés felhasználása a városklíma-kutatás különböző területein amint azt Pongrácz, Dezső és munkatársai, Dousset és Gourmelon, illetve mások publikációi

tanúsítják [2.26] [2.27] [2.28]. Az elért eredményeken alapulnak napjaink Crawford és Grimmond, Mailhot és kollégái, Krayenhoff és Voogt, Unger és munkatársai, illetve Molnár által létrehozott városi energia- és hőtranszport-, levegőminőség- és légáramlásmo­delljei [2.29] [2.30] [2.31] [2.32] [2.33] [2.34] [2.35].

A jelenség bizonyított hatással van az ember szervezetére, egészségére. Ezért, a kutatók jelentős Probáld, Molnár, Ait-Ameur, Jendritzky, Andrade, Johansson és munkatársai, Katzshcner, Petralli és kutatócsoportja, Rohinton és kollégái, illetve Shript és munkatársai által képviselt csoportjának érdeklődése a városklíma biometeorológiai hatásainak, a városi humánkomfort vizsgálatának irányába fordult [2.36] [2.37] [3.38] [3.39] [2.40] [2.41] [2.42] [2.43] [2.44] [2.45] [2.46].

Az épületek, épületcsoportok elhelyezésében, tájolásában, a zöld felületek létrehozásában, klimatikus szempontból minél komfortosabb lakókörnyezet kialakításában a városklíma-, s a városi humánkomfort-vizsgálatok segítséget nyújthatnak az építész­eknek, ahogyan ezt Troudert, Mayer és mások munkái is alátámasztják [2.47]. Erre ott van elsősorban lehetőség, ahol új településeket, településrészeket építenek. Jó példák­kal találkozhatunk az ilyen együttműködésre izraeli kutatók mint Cohen, Pochter és munkatársaik, vagy Coutts és kollégái részéről [2.48] [2.49].

Napjainkban Sproken-Smith és Oke, Bacci és munkatársai, illetve Shashua és kol­légái vizsgálataiban egyre nagyobb hangsúlyt kapnak a városi zöld felületek, parkok a hősziget kedvezőtlen következményeit mérséklő hatásának, a „park hűvös sziget” („Park Cool Island” – PCI) jelenségnek a kutatásában [2.50] [2.51] [2.52].

Magyarországon a városklímával kapcsolatos kutatások már a 19. század végén el­kez­dődtek. Az akkori munkák inkább csak történeti érdekességek, melyekben a szerzők *Budapest és környéke éghajlati viszonyait elemezték*, az addig összegyűlt mérési adatok alapján. Az első modern, valóban városklimatológiai értékelés az 1970-es években ké­szült. *Probáld Ferenc* 1974-ben *Budapest városklímája* című munkájában részletesen tárgyalta a városnak az egyes meteorológiai elemekre gyakorolt hatásait, elemezte a levegőszennyezettség hatásait, sőt, még különböző klímaterületeket is kijelölt a fővá­roson belül [2.53]. Ezt Miklósi munkája egészítette ki az 1980-as évek elején [2.54].

Napjainkban a hazai városklíma kutatás elsősorban a hősziget-effektusra és a városi levegőszennyezőkre koncentrál. A felszíni mérések mellett a hősziget­hatás műholdfel­vételek alapján történő értékelésére is sor került Budapest mellett több vidéki váro­sunk vonatkozásában. Az ELTE Meteorológia Tanszékén Bartholy Judit, Dezső Zsuzsa Pongrácz Rita a Terra műhold MODIS szenzora által érzékelt felszíni hőmérsékletek alapján értékelte több településünk hőszigetének jellegzetességeit [2.27].

Kevés városunkról készültek átfogó vizsgálatok és azok eredményeit értékelő mun­kák. Szegedre *Unger János, Bottyán Zsolt, Gulyás Ágnes és Süme­ghy Zoltán* [2.55] [2.56] [2.57], illetve a levegőminőség vonatkozásában *Makra László és munkatársai* [2.58] [2.13] [2.59] [2.60] [2.61] [2.62] [2.63] [2.64] [2.65] vizsgálatai emelkednek ki. Deb­recenre a *Justyák János, Tar Károly, valamint Szegedi Sándor* [2.66] [2.67], valamint Egerre a *Roncz Béla* (Roncz 1984) nevéhez fűződő eredmények érdemelnek említést. A városi környezettel, a [2.68] lokális és mikroklimákkal foglalkozó egyetemi jegye­tekben, továbbá a levegőminőség-védelemmel foglalkozó szakkönyvekben is megjele­nik a városklíma problémája [2.69] [2.70] [2.71] [2.72] [2.73].

Debrecenben az itt tárgyalt kutatások mellett, részben azzal összefüggésben történtek vizsgálatok a városi hőtöbblet és a növények fenológiai fázisaiban a városon kívüli területekhez képest bekövetkező eltolódásokra vonatkozóan is [2.74] [2.75]. Szegedi és munkatársai a Debrecenben és a környezetében fekvő településeken vizsgálták a hősziget tér és időbeli jellegzetességeit [2.76].

2.3. A városklíma térbeli lehatárolása

Ahogy a város mint térbeli egység kisebb elemek (épületcsoportok, utak, parkok stb.) mozaikjából épül fel, úgy a városklíma is kisebb építőkövek, mikroklímák mozaikjaként jelenik meg [2.77]. Az épületeken kívül megfigyelhető, kis térbeli kiterjedésű éghajlati jelenségek, *a mikroklímák rövid időtartamú, változékony jelenségek. Jellegzetes kifejlődésük konkrét, jól definiálható időjárási helyzetekhez kötődik: a derült, szélcsendes, anticiklonális időjárási helyzetek kedveznek kialakulásuknak* [2.70] [2.69]. A különböző felszínfedésű, tájolású, méretű utcák, terek, parkok és udvarok mindegyike közös vonásokkal is rendelkező, mégis sajátos éghajlatot alakít ki. *Az azonos jellegzetességek a városi helyi klíma keretében mutatkoznak meg.* A városklíma az Orlanski-féle osztályozás alapján meso- γ skálájú légköri jelenség [2.78].

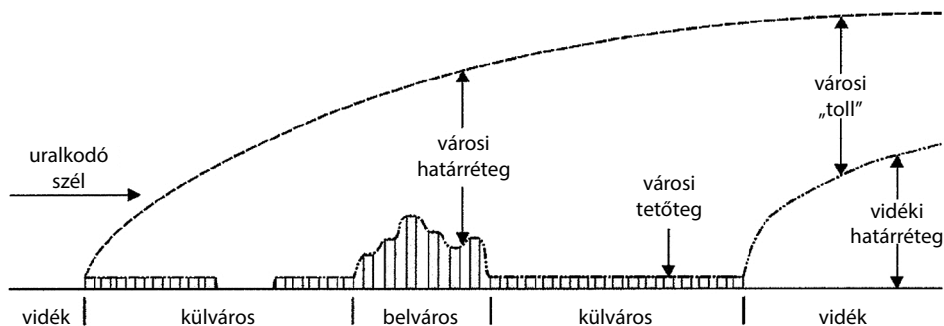
A város klímamódosító hatásának vizsgálatánál *a viszonyítási alap mindig a tágabb beágyazó környezet „háttérklímája”.* Ha a város nem állna ott, akkor az adott szűkebb helyen ennek *a háttérklímájának a város helyén jellemző természetföldrajzi viszonyok által meghatározott értékeit mérhetnénk. Erre az alapra rakódik a város klímamódosító hatása.*

A városok légtere az erős horizontális tagoltság mellett sajátos vertikális rétegzettséget is mutat. Ezek a rétegek a vastagság, és jellegzetes folyamataik alapján elkülönülő városi határréteg és a városi tetőszintréteg [2.79].

A városi határréteg (Urban Boundary Layer – UBL) magassága erősen változó, függ a felszíni érdességi viszonyoktól. A városi határréteg *két további, a tetőszint alatti és feletti rétegre különíthető el* (2.1. ábra). A városi határréteg *lokális vagy mezoléptékű éghajlati jelenség.* Alapja a tetőszint közelében van, jellemzőit a városi felszín fizikai paraméterei határozzák meg.

A UBL szerkezete és dinamikája nappal hasonló a vidéki határrétegéhez (Rural Boundary Layer – RBL), azonban örvényesebb (turbulensebb) légmozgásokkal rendelkezik, melegebb, szárazabb és a légszennyező anyagok koncentrációja akár nagyságrendekkel is nagyobb benne [2.79]. A városi határréteg burok formájában öleli körül a települést. Független kiterjedése meghaladja az RBL magasságát.

A városi határréteg alakja attól függ, hogy milyen a környező légtér függőleges hőmérsékleti eloszlása, van-e hőmérsékleti inverzió, s milyen erős a szél. Az inverziós réteg alatt a légszennyező anyagokból egy „szennyező kupola” alakul ki. Ez szélcsend esetén megül a városon, szabályos dóm alakot vesz fel. Inverziómentes helyzetben a kupola tetőszint feletti részében erősen keveredik a levegő a városon kívüli tisztább levegővel. A hőmérsékleti inverzió megakadályozza ezt a keveredést, a szennyező anyagok ilyenkor az inverziós réteg alatti talajszint közeli légtérben feldúsulhatnak.



2.1. ábra. A városi légkör szerkezete

Forrás: [2.69]

Már gyenge vagy közepes erősségű szélben (2–5 m/s szélesség esetén) is a városi határreteg egy füstfáklya formájában elnyúlik a vidéki (természetes) légköri határreteg felett a szélirány szerint (2.1. ábra). Így a városon túl a természetes felszín fizikai paramétereinek megfelelően kifejlődött RBL fölött – sokszor a várostól 10–100 km-es távolságra is kiterjedve – helyezkedik el ez a városi levegő tulajdonságait hordozó réteg. Ilyen helyzetben a város irányából érkező szennyező anyagok a vidéki határreteg fölé kerülnek, ezért lefelé nem mozoghatnak, csak felfelé van keveredési, hígulási lehetőségük. A városon kívüli terület felett így bizonyos magasságig viszonylag tiszta légtér alakulhat ki.

Éjszaka az UBL gyökeresen más dinamikájú, mint vidéki megfelelője. Zavartalan, derült szélcsendes meteorológiai feltételek között magassága gyakran a 300 m-t is eléri, és továbbra is jellemző rá a viszonylag erős keveredés, míg az RBL-ben a kisugárzás hatására erőteljes inverziós rétegzettség alakul ki.

Az UBL-en belül, az átlagos tetőszintmagasságban alakul ki az ún. városi tetőszintréteg (Urban Canopy Layer – UCL). Magassága városnegyedenként a beépítési típusokra jellemző átlagos tetőszintmagasság eltéréseihez igazodva ingadozik. Tulajdonságait mikroléptékű (épületekhez, terekhez, parkokhoz stb. kapcsolódó) folyamatok határozzák meg [2.79].

2.4. A városklíma kialakulásának okai

A klímaelemek változásait a városi térben alapvetően az okozza, hogy a mesterséges felszín hő- és vízgazdálkodási tulajdonságai valamilyen mértékben eltérnek a természetes felszínektől. Ezek a módosulások röviden a következőkben foglalhatók össze:

- ♦ Megváltozik a városi légkör összetétele és szerkezete. A termelési és fogyasztási folyamatok során jelentős mennyiségű, mikrométer-, tizedmikrométer méretű szilárd vagy cseppfolyós halmazállapotú diszperz részecske, ún. *aeroszol*, illetve a légkör sugárzás-visszatartó képességét befolyásoló gáz kerül a levegőbe. Ezek fontos szerepet játszanak az energiamérleg és a kondenzáció folyamataiban, a városi légtérben.

- ♦ Az épületek tetőszintjében egy új sugárzáselnyelő és sugárzó aktív felszín jön létre.
- ♦ A városi felszínt elsősorban felépítő mesterséges anyagok a természetes anyagoktól jelentősen eltérő hőtani jellegzetességekkel rendelkeznek. Albedójuk általában kisebb, ugyanakkor hővezető képességük és hőkapacitásuk nagyobb a természetes anyagokéihoz képest.
- ♦ A tagolt városi aktív felszín összetett geometriájának köszönhetően csökken a hosszúhullámú kisugárzási veszteség a beépítetlen területekhez viszonyítva.
- ♦ A városi légkör energiamérlegében a különböző földrajzi szélességeken eltérő arányban, de fontos szerepet játszik az emberi tevékenységek során (közlekedés, energiatermelés, fűtés, ipar) előállított és a városi légkörbe juttatott hő.
- ♦ A természetes felszín helyét víz át nem eresztő utak, járdák, és csatornák rendszere veszi át. Ennek következtében a felszínre érkező csapadék sokkal kisebb hányada szivárog be a talajba, mint a természetes felszínek esetében. A lefolyó víz mennyisége és a lefolyás sebessége ugyanakkor jelentősen megnő.

A fenti változások eredményeként a városi beépített felszínek energiaegyenlege jelentősen eltér a természetes felszínekétől, ami végső soron az éghajlati elemek módosulásához vezet. A változásokat és következményeiket a 2.1. táblázat foglalja össze.

2.1. táblázat. A városklíma kialakulásához hozzájáruló tényezők a városi határrétegben és a városi tetőszintrétegben

A városklíma kialakulásában szerepet játszó tényezők és következményeik	Változások az energiaegyenlegben
Városi határréteg (UBL)	
Nagyobb homályosság: erősebb extinkció	Megnövekszik a rövidhullámú sugárzás elnyelés
Kémények, környezetükből kiemelkedő épületek hőveszteségei	Antropogén hőtöbblet
UCL hősziget a tetők szintjéből erősebb hőáramlást idéz elő	Nő a szenzibilis hőbevitel az UCL irányából
Városi tetőréteg (UCL)	
Nagyobb légszennyezettség: nagyobb elnyelés és visszasugárzás	Több hosszúhullámú sugárzás az égbolt felől
Az épületek és a gépjárművek által a légkörbe juttatott hő	Antropogén hőtöbblet
Az utcák geometriája: nagyobb aktív felszín és többszörös visszaverődés	Megnövekedett rövidhullámú sugárzás elnyelés
Az építőanyagok nagyobb hővezető képessége	Nagyobb szenzibilis hőtárolás
Az utcák geometriája növeli a horizontkorlátozás mértékét	Csökken a hosszúhullámú sugárzási veszteség
A mesterséges felszínborítás kisebb vízáteresztő képessége	Nagyobb lefolyás; csökkenő vízviszattartás, kisebb evapotranszpiráció
A érdesebb városi felszín: csökkenő szélesség	Kisebb turbulens hőszállítás

Forrás: [2.71] alapján.

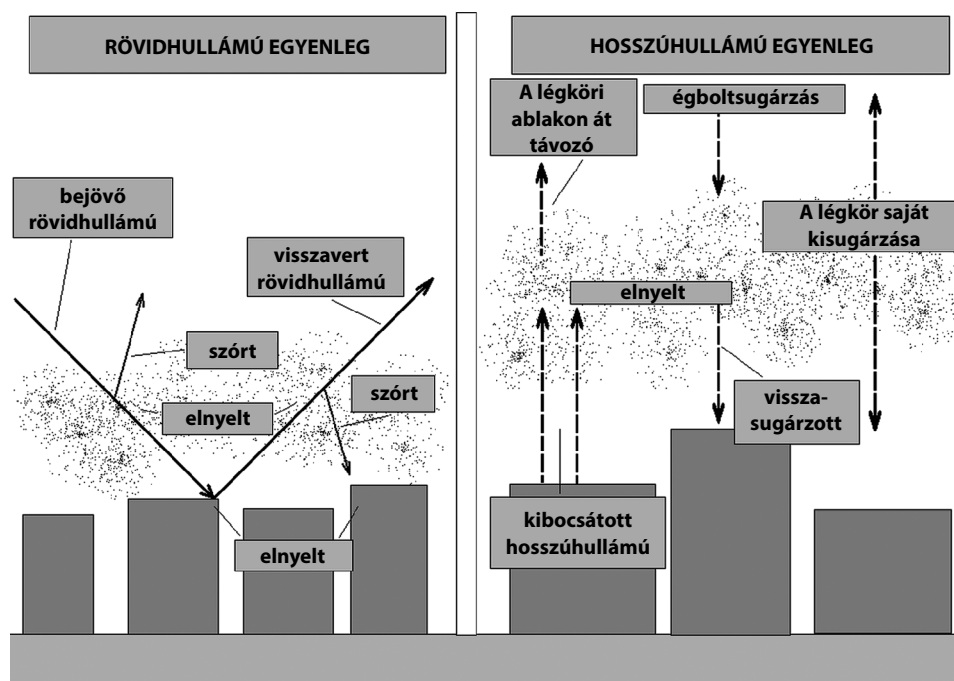
2.4.1. Az energiaegyenleg változásai a városi területeken a természetes felszínekhez képest

Az energiaegyenleg szempontjából az adott felszín teljes sugárzásegyenlege alapvető fontosságú, mivel meghatározza a rendszerbe bejutó és bennmaradó napsugárzásból származó, a felszín és a felszín feletti légtér közti kölcsönhatások, meteorológiai folyamatok számára rendelkezésre álló energiamennyiséget.

A teljes sugárzási egyenleg (Q^*) rövid- és hosszuhullámú összetevőkből áll (2.2. ábra). A rövidhullámú egyenleg (S^*) a légkörön át a felszínt elérő ($S\downarrow$) és a felszín által visszavert rövidhullámú sugárzásmennyiség ($S\uparrow$) különbsége (a felszín által elnyelt rövidhullámú sugárzási energiamennyiség). A hosszuhullámú egyenleg (L^*) az elnyelt rövidhullámú sugárzástól felmelegedő felszín által kisugárzott ($L\uparrow$) és a légkör üvegházgázai által elnyelt és visszasugárzott hosszuhullámú sugárzási energiamennyiség ($L\downarrow$) különbsége (effektív kisugárzás, vagyis a légkörből távozó hosszuhullámú sugárzási energiamennyiség):

$$Q^* = S^* + L^* = S\downarrow - S\uparrow + L\downarrow - L\uparrow \quad (2.1)$$

A mesterséges városi felszín és a vidékitől eltérő összetételű városi légtér esetében a sugárzási egyenleg minden egyes összetevője módosul.



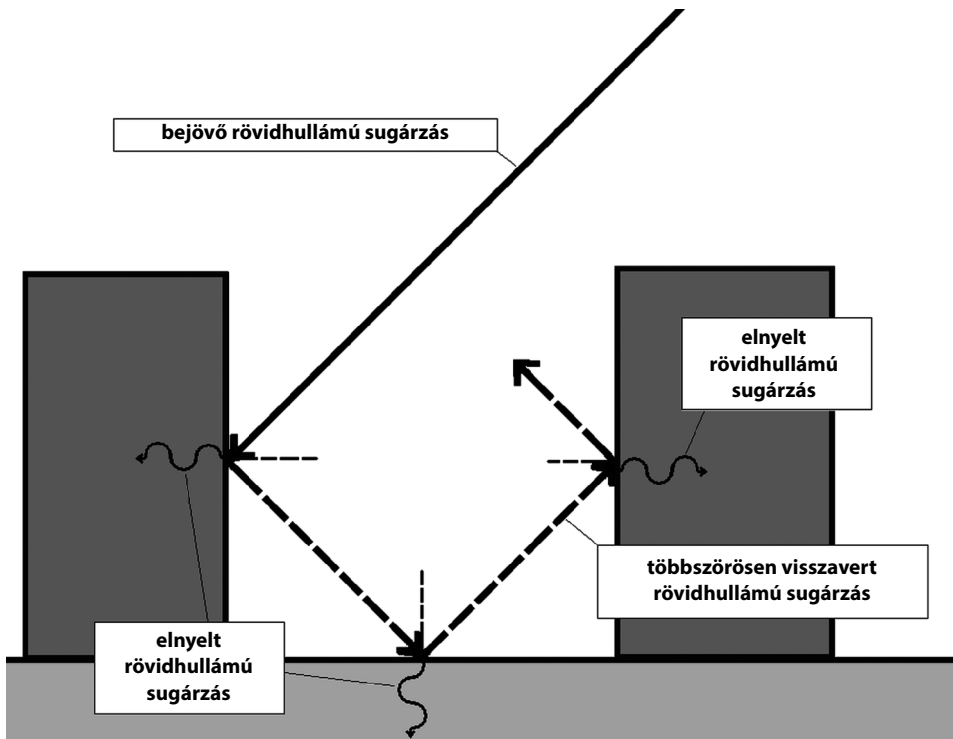
2.2. ábra. A városi felszín sugárzási egyenlegének összetevői

Forrás: [2.67]

A városi levegő homályossága nagyobb, benne a vidéki területekéhez képest tízszer, ezerszer nagyobb az aeroszol részecskék térfogategységen belüli aránya [2.80]. Ennek következtében a sugárzásátbocsátó képessége kisebb. A bejövő rövidhullámú sugárzás (globálsugárzás), ami direkt és szórt, valamint a visszavert sugárzás felszín felé szórt összetevőiből áll, a városi légtérben átlagosan 2–10%-kal kevesebb a vidéki területekhez képest [2.79].

A városi felszínek építőanyagainak albedója átlagosan 5–10%-kal kisebb a természetes felszínekre jellemző értéknél. A kevesebb beérkező sugárzásnak tehát nagyobb hányada nyelődik el a városi felszíneken. Következésképp, a rövidhullámú sugárzási egyenlegben a pozitív és negatív hatások nagyjából kiegyenlítik egymást. Közrejátszik ebben az is, hogy az erősen tagolt városi felszín nagyobb sugárzáselnyelő aktív felszínt jelent, hiszen a vízszintes felületek mellett a kiterjedt falfelület is szerepet játszik a sugárzáselnyelésben. A tagolt vízszintes és függőleges felszínek közötti többszörös visszaverődés szintén növeli az elnyelt rövidhullámú sugárzás mennyiségét a természetes felszínekhez képest (2.3. ábra).

A városi határrétegben tehát csökken a vízszintes felszínre beérkező globálsugárzás mennyisége. A tetők jelentős része azonban nem vízszintes, így azokon a lejtős felszínekre jellemző sugárzásmódosító domborzati hatások érvényesülnek. Mindezek röviden a következőkben foglalhatók össze.



2.3. ábra. A tagolt városi felszínen lejátszódó többszörös visszaverődés szerepe a rövidhullámú sugárzáselnyelés megnövekedésében

Forrás: [2.67]

A lejtőkön a tájolás és a dőlésszög szerint jelentős sugárzásbeviteli és hőmérsékleti különbségek alakulnak ki. Ez az *expozíciós hatás*. *Közepes szélességeken (az északi féltekén) a keleti, déli és nyugati tájolású lejtők a vízszintes síkhoz képes évente max. +36% közvetlen sugárzási többletben részesülnek*. Legnagyobb besugárzási többlet a 25°–45° hajlásszögű lejtőkön a téli félévben jelentkezik [2.81]. A legerősebb a csökkenés a téli napfordulón az északi lejtőkön. A déli lejtők energiabevétele nyáron csak 20° dőlésszözig nő az észak felé hajló nappálya miatt. A lejtőszög növekedésével a különböző tájolású lejtők közti energiabevételi különbség fokozódik.

Az expozíciós hatás a közepes szélességeken érvényesül a legerősebben, míg a nagy besugárzásban részesülő trópusokon és a kevés sugárzási energiához jutó sarkvidéki területeken ennek a jelentősége jóval kisebb.

Hazánkban a számítások szerint az eltérő tájolású és dőlésszögű lejtőkre jutó napi energiamennyiség a vízszintes síkra érkező energiamennyiség %-ában kifejezve a következőképpen alakul (2.2. táblázat).

2.2. táblázat. A különböző tájolású és dőlésszögű lejtőkre érkező sugárzási energiamennyiség eltérései

Lejtőirány	Lejtőszög				
	0°	10°	25°	45°	90°
É	100	88	58	19	2
ÉK	100	96	75	49	19
K	100	101	85	77	41
DK	100	119	125	121	64
D	100	119	131	136	74

Forrás: [2.81]

A mesterséges felszíneket alkotó építőanyagok hőelnyelő, hőszállító és hőtároló képessége nagyobb a természetes felszínek anyagaira jellemző értéknél. A mesterséges felszínek, illetve a szennyezett városi levegő kisugárzóképesége ugyanakkor kisebb a természetes felszínekénél. A kisebb sugárzásienergia-kibocsátó képességet azonban a hősziget, a melegebb városi levegő erősebb kisugárzása ellensúlyozza [2.71]. A város légterében a nagyobb koncentrációban jelen lévő üvegházhatású gázok hatékonyabban tartják vissza a sugárzási energiamennyiséget. A felszín geometriája, az egymással szemközti falfelületek közötti *összesugárzás*, illetve a *magas épületek közötti nagyobb horizontkorlátozás* (SVF – Sky View Factor), a 180°-nál kisebb kisugárzási térszög szintén csökkenti a kisugárzási veszteséget.

A hosszúhullámú sugárzási egyenleg esetében is egymást kioltó folyamatok működnek. A városi terület teljes sugárzási mérlegének eltérése a külterületétől általában nem több 5%-nál [2.79]. Ezek a változások önmagukban még nem indokolják jelentős hőtöbblet kialakulását a városi területeken.

A teljes sugárzási egyenleg a felszín energiaegyenlegének az alapja. Az energiaegyenlegben a sugárzási egyenleggel különböző felszíni termodinamikai folyamatok tartanak egyensúlyt. A természetes felszínek energiamérlegének alakulásában a nappali rövidhul-

lámú sugárzás és az éjszaka kizárólagos hosszúhullámú sugárzás egyensúlya játszik szerepet. A felszín energiatöbbletét/-vesztését a talaj irányába/irányából történő konvektív hőszállítás (Q_G), valamint a légkör irányába/irányából történő szenzibilis (Q_H) és latens (Q_E) hőtranszport ($Q_H + Q_E$) egyenlíti ki. A latens hőmennyiség a víz párolgása és az élőlények párologtatása (evapotranspiráció) által elvont hőmennyiséget, míg a szenzibilis (magyarul érzékelhető) hő a levegő felmelegítésére fordított hőmennyiséget jelenti. A természetes felszín energiaegyenlege (Q^*) tehát a következőképpen alakul:

$$Q^* = Q_H + Q_E + Q_G \quad (2.2)$$

Mivel azonban az energiatranszport-folyamatokban a talajban és a vízben hővezetés is történik a mélyebb szintek felé, ezért ezekben a rendszerekben az energiatárolás változását (ΔQ_s) is figyelembe kell venni. Az előbbi egyenlet tehát így módosul:

$$Q^* = Q_H + Q_E + Q_G + \Delta Q_s \quad (2.3)$$

Antropogén hatások következtében a városi felszín energiaegyenlegében is új elemek jelennek meg, illetve módosul a korábban tárgyalt elemek aránya. Az előbbi tényezők mellett az emberi tevékenységek során a légkörbe kibocsátott hőmennyiséget (Q_F) is figyelembe kell venni. Ennek értéke hozzáadódik a sugárzási egyenleg értékéhez. A városi területek energiaegyenlege így:

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + Q_G + \Delta Q_s \quad (2.4)$$

Az *antropogén hőtöbblet* a fűtés/légkondicionálás, közlekedés, ipari termelés és más energiaszabaddítási folyamatok melléktermékeként kerül a városi légkörbe. Ennek a természetes energiabevételhez viszonyított aránya a földrajzi szélességtől és a város fejlettségétől függ. Napi átlaga a mérsékelt égövben az elővárosi területeken 5 W/m^2 , míg a belvárosi területeken 50 W/m^2 körül mozog. Értéke általában a mérési határon belülre esik, tehát mérni még elvileg sem lehet. Magas szélességeken, illetve a legfejlettebb metropoliszok központi területein értéke a napsugárzásból származó energia-bevétellel összemérhető lehet. Általában attól egy nagyságrenddel kisebb az aránya [2.82].

A *városi területek építőanyagai* a természetes felszíneket felépítő anyagoknál sokkal több hő tárolására képesek nagyobb hővezető képességük és hőkapacitásuk miatt. A nagyobb hőtárolás hatása különösen az éjszaka folyamán jelentős, ilyenkor a tárolási tényezőnek döntő szerepe van a teljes energiaegyenleg alakításában. A nagyobb hőtárolásban a városi felszín geometriájából adódó kisebb kisugárzási veszteségnek is szerepe lehet [2.69].

A *szenzibilis és latens hő arányát* (Q_H/Q_E) a *Bowen-arány* fejezi ki. Ezt a felszín termodinamikai tulajdonságai és a légkör állapota (elsősorban a turbulencia szintje) határozza meg. A turbulens hőszállításon belül a *szenzibilis és latens hő arányát* döntő módon befolyásolja a *felszín nedvességi állapota*.

Ha a felszín nedvesség ellátottsága bőséges, az evapotranspiráció mértéke csak a rendelkezésre álló energia mennyiségétől függ. A latens hő aránya ilyen esetben maxi-

mális, következésképp a levegő felmelegítésére fordítható szenzibilis hő aránya minimális. A nedvesebb felszín felett a levegő tehát azonos mennyiségű rendelkezésre álló energia esetén kevésbé melegedhet fel. *A felszín nedvességének csökkenésével párhuzamosan a felszín által elnyelt sugárzási energiának egyre nagyobb hányada fordítható annak felmelegítésére: tehát a Q_H aránya növekszik a Q_E rovására.*

Amint láthattuk, a természetes és városi felszínek jelentősen eltérő energia egyenleggel jellemezhetők. Ezek az eltérések a két terület eltérő vízmérlegével magyarázhatók. Mivel a sugárzási egyenleg nem tér el jelentősen a két területen, csak a nedvességellátottság különbségei vezethetnek az energia-egyenleg eltéréseihez [2.69]. *Csapadékos időszakokban, amikor a városi és a természetes felszín nedvességellátottsága is bőséges, az eltérések minimálisak. Ugyanakkor a száraz periódusokban a város az érzékelhető hő felhalmozódásának területévé válhat.*

2.4.2. A városi vízmérleg

A természetes területek vízmérlegében a bevételi oldalon áll a lehullott csapadékmennyiség (p). Ezzel tart egyensúlyt az evapotranszspiráció (E), a felszíni és felszín alatti lefolyás (Δr), a beszivárgás (f), a kapilláris vízemelés (k), a tárolás (Δs), valamint a horizontális nedvességszállítást és a talajvízképződést is figyelembe véve a nedvességadvekciónak mértéke (ΔA):

$$p = E + \Delta r + f + k + \Delta s (+ \Delta A) \quad (2.5)$$

Az evapotranszspiráció a felszíni párolgás (evaporáció) és az élőlények párologtatása (transzspiráció) által együttesen a légkörbe juttatott vízmennyiség. Ebbe a felszínen tárolt és később elpárolgó víz, vagyis az intercepció is beleértendő).

A városban koncentrálódó egyes tevékenységek, illetve a felszín mesterséges módosításai a vízmérleg tényezőinek változásait, illetve új tényezők megjelenését idézik elő. A módosított vízmérleg a következő egyenlettel írható le:

$$p + I + F = E + \Delta r + f + k + \Delta s (+ \Delta A), \quad (2.6)$$

ahol I a városi rendszerbe kívülről, az ember által bejuttatott víz, melynek mennyisége a csapadékhoz viszonyítva is igen jelentős lehet egy fejlett nagyváros esetében. F az égési folyamatok révén a légkörbe kerülő víz. Ennek a volumene sem elhanyagolható, hiszen a fosszilis tüzelőanyagok elégetése során a szén-dioxidhoz hasonló mennyiségben keletkezik. Pl. egy metán molekula tökéletes égése során egy szén-dioxid és két vízmolekula jön létre:



Ezek a tényezők tehát növelik a városi rendszer vízbevételét. *A párolgás és a tárolt víz mennyisége ugyanakkor csökken.* Csökken továbbá a természetes talajfelszín és a növényzettel borított felszínek kiterjedése is, melyek az evapotranszspiráció fő for-

rásai. A mesterséges, vizet át nem eresztő talajfedés akadályozza a beszivárgást, ami ugyancsak csökkenti a párolgást (E) és a tárolt víz mennyiségét (Δs) is.

A mesterséges felszínekről az ember igyekszik eltávolítani a vizet, ily módon csatornázza az általa felügyelt területeket. A kis érdességű, növényzet nélküli felszíneknek egyébként is kisebb a vízviszatartó képessége. A lefolyás rajtuk gyors, robbanásszerű (Δr).

A városi felszín nedvességellátottsága összességében tehát kisebb, mint a természetes felszíné. *Ez az energiamérlegen belül az érzékelhető hő arányának a megnövekedését idézi elő a latens hő rovására, tehát hozzájárul a városi hőtöbblet kialakulásához, ami közvetlenül, vagy közvetve minden éghajlati elem változását maga után vonja.*

2.5. Az éghajlati elemek módosulásai a városklímában

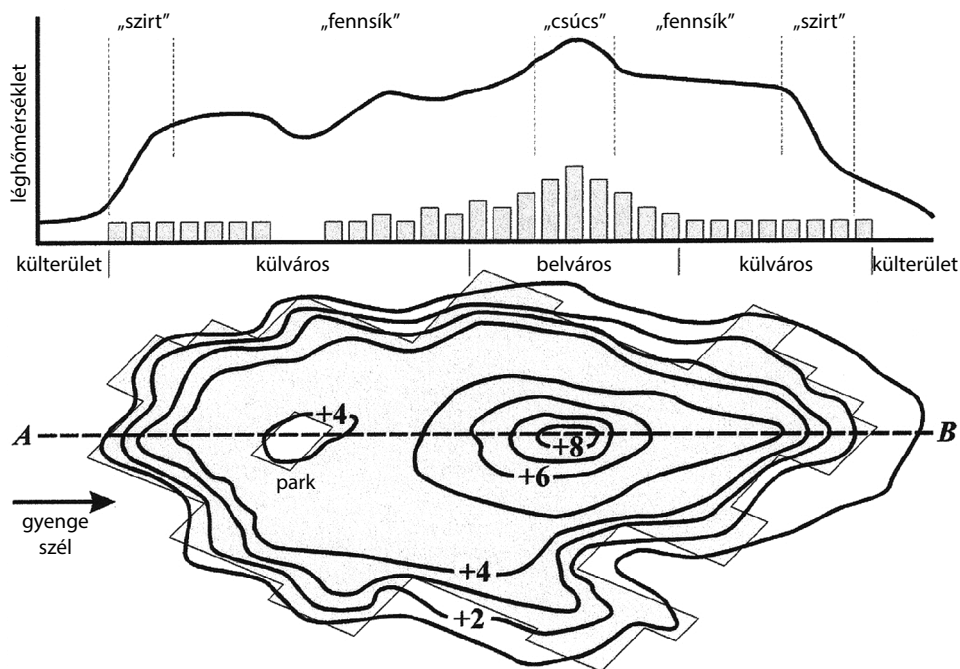
A városklíma és a városi hősziget kialakulásának döntő jelentőségű eleme a beépített városi felszín természetestől eltérő hőháztartása. Ez közvetlenül, vagy áttételesen hatással van a hőmérséklet és a párolgás alakulására, valamint a légcirkuláció, a kondenzáció és a csapadékképződés folyamataira is.

2.5.1. A városi hősziget

A városok éghajlat-módosító hatásai között fontos helyet foglal el az egyik legkorábban leírt jellegzetesség, a városi hőmérsékleti többlet. Az energia- és vízmérleg előzőkben ismertetett megváltozása, az érzékelhető hő arányának és a hőtárolásnak a megnövekedése különösen napnyugta után jelentősen melegebbé teheti a város levegőjét a környező beépítetlen területekhez képest [2.82]. A város ilyenkor meleg szigetként emelkedik ki a környező területek hideg tengeréből. A jelenség az izoterma-térképeken a szintvonalas térképek hegy, vagy sziget ábrázolásaihoz hasonlatos képet mutat. Innen ered a városi hősziget elnevezés (2.4. ábra).

A városi hősziget fejlődése sajátos idő- és térbeli jellegzetességeket mutat. Számos vizsgálat szerint a nyári, őszi eleji időszakban, vagy télen a legerősebb a hősziget jelenség, míg más települések esetében nem változik jelentősen az év folyamán. Budapest esetében, pl. a havi átlaghőmérsékletben $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ többlet mutatkozik januári maximummal [2.53].

A település és a környező beépítetlen területek közötti hőmérsékleti különbség – az ún. *hősziget-intenzitás* – főként nyáron, a derült szélcsendes időszakokban mutat jelentős napi eltéréseket. Ilyen esetekben a hőmérsékleti különbség napközben minimális. Előfordulhat, hogy a városban hidegebb van a környezeténél, majd a városi hőmérséklet délután, napnyugta után kezd növekedni, amikor a napközben elnyelt hő a mesterséges aktív felszínnek visszasugározzák. *A hősziget legerősebb kifejlődését általában napnyugta után 3–5 órával éri el, majd újra gyengülni kezd [2.53].* Télen és borult, szeles időben a napi menet kevésbé határozott, de a különbség akkor is az esti órákban a legnagyobb [2.83].



2.4. ábra. A városi hősziget
Forrás: [2.69]

A hősziget kifejlődése jelentős mértékben függ a nagytérégi meteorológiai feltételektől. Legerősebb derült szélcsendes, anticiklonális időjárási helyzetekben, amikor a ki- és besugárzás zavartalan, illetve a szél nem fújja el a beépített terület felett felmelegedő levegőt. Ilyen esetben nagyobb városok felett akár 300–400 m magasságig is kimutatható a városi határrétegnek a környezeténél melegebb levegője [2.71].

Az éjszaka folyamán a városon kívüli területek légterében gyakran hőmérsékleti inverzió alakul ki. Ennek következtében a vidéki terület felett néhány száz méter magasságban melegebb lehet, mint a talaj közelében. Ilyen helyzetben, a városi inverziómentes légrétegben adott magasságban alacsonyabb lehet a hőmérséklet, mint a természetes felszín feletti inverziós rétegzettségű levegőben, ugyanabban a magasságban. Ezt a jelenséget nevezik *cross over hatásnak*.

Korai felismerés, hogy borult és/vagy szeles időjárás esetén a hősziget gyenge, vagy ki sem alakul [2.84]. A kritikus szélesebesség, ami „elfújja” a hőszigetet, függ a településmérettől: a nagyobb városok erősebb hőszigettel rendelkeznek. A kritikus szélesebesség és a lakosságszám logaritmus (közvetve a településméret) közötti összefüggést adja meg a következő képlet [2.79]:

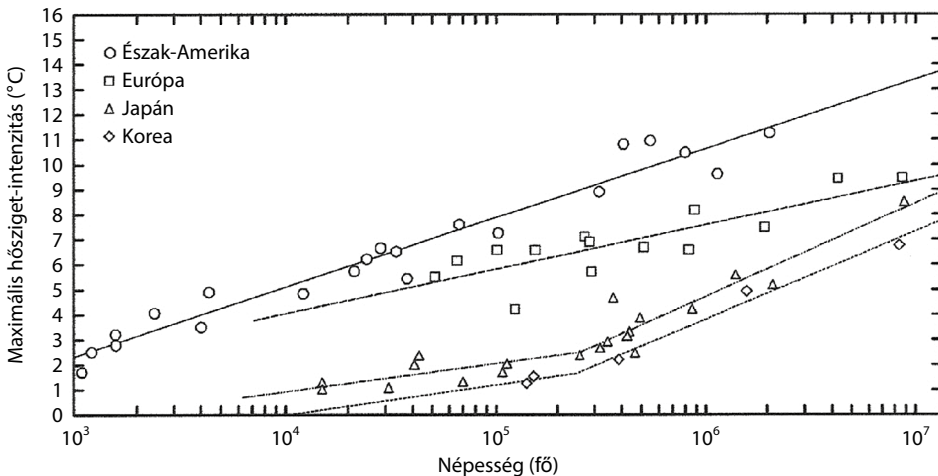
$$v = 3,41 \times \lg P - 11,6 \text{ [m/s]} \quad (2.7)$$

A hősziget alakját már kisebb szélesebesség is deformálja. A városi határréteg melegebb levegőjét a vidéki határréteg fölé húzza a város lee oldalán.

A hősziget térbeli képét az adott település mérete és beépítési viszonyai határozzák meg [2.85]. Ennek alapján általánosságban megállapítható, hogy *a peremek felől a városközpont felé – a beépítés sűrűségével párhuzamosan – haladva növekszik a hősziget intenzitása*, vagyis növekszik a külterülethez képest a hőmérséklet-különbség [2.86]. *A település méretével, lélekszámával logaritmikus összefüggés szerint növekszik a hősziget erőssége.* Amerikai kutatók [2.87] empirikus formulát dolgoztak ki a lakosság szám és a hősziget-intenzitás közötti összefüggés leírására:

$$\Delta T_{(u-r)\max} = 2,01 \times \log P - 4,06, \quad (2.8)$$

ahol $\Delta T_{(u-r)\max}$ a hősziget-intenzitás, vagyis a városi (u) és a vidéki (r) területen mért hőmérséklet különbsége, P pedig a település lakosságszáma. *Hogy mekkora a legkisebb településméret, amely még hőszigetet generálhat, azt az adott területen jellemző beépítési szerkezet dönti el* (2.5. ábra). Az ábra csak sejtetni engedi, hogy 1000 főnél kisebb lakosságú európai és észak-amerikai településeken is kialakulhat hősziget. Erre vonatkozóan azonban még a nemzetközi szakirodalomban is kevés a rendelkezésre álló adat. A települések méretének növekedésével párhuzamosan a hősziget-intenzitás is növekszik [2.88]. *Egy-egy város méretének növekedésével tehát a hősziget-hatás is erősödik.*



2.5. ábra. A hősziget-intenzitás és a településméret közti összefüggés különböző országokban végzett mérések alapján
Forrás: [2.69]

A hősziget kialakulása szempontjából a városok lakosság számán keresztül figyelembe vett méret csak az egyik fontos paraméter. Mivel az eltérő építészeti hagyományokkal rendelkező kontinenseken, országcsoportokban azonos lélekszámhoz és térbeli kiterjedéshez jelentősen eltérő szerkezet, beépítési sűrűség tartozhat, az egyes

országok azonos lélekszámú településein nagyon különböző erősségű hőszigetek alakulhatnak ki, amint az a 2.4. ábrából is kitűnik. A településméret mellett célszerű az utcák geometriai paramétereit figyelembe vevő H/W arány alkalmazása, ahol H (height) az épületek átlagos magassága, míg a W (width) az utcák átlagos szélessége. Ennek felhasználásával a maximális hősziget-intenzitásra a következő összefüggés adódik [2.70]:

$$\Delta T_{(u-r)\max} = 7,54 + 3,97 \ln(H/W) \quad (2.9)$$

A H/W arány alapvetően hat a sugárzási egyenleg alakulására a városi területeken, ezért erősen befolyásolja a városi hősziget kialakulását is.

A hősziget pozitív hatása, hogy csökkenti a téli félévben a fűtési energia szükségletet, a fagyos és a téli napok számát, a hideg időszakok hosszát. Nő ugyanakkor a nyári és hőségnapok száma. Negatív hatásai főképp a meleg nyarú területek nyarán jelentkeznek. Az esti-éjszakai magasabb hőmérséklet jelentősen ronthatja a városi lakók komfortérzetét.

2.5.2. A köd és a csapadék jellemzőinek változásai a városokban

A párologtató természetes felszínek visszaszorulása, esetenként teljes hiánya és a magasabb városi hőmérséklet együttesen *a relatív nedvességtartalom jelentős, 8–10%-os csökkenését idézi elő a városok légterében a városon kívüli területekhez képest* [2.69]. A különbség a hőmérsékleti többlethez igazodva a legnagyobb általában nyáron és az esti órákban [2.5]. A párányomás esetében a kép összetettebb, függ a vizsgált várostól és időszaktól.

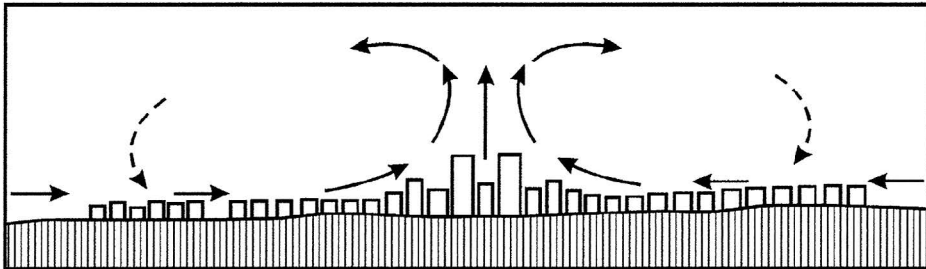
A kondenzációs magok nagy száma a viszonylag alacsony légnedvesség ellenére is elősegíti a vízgőz kicsapódását. A ködképződés – különösen a nagyvárosokat átszelő folyók mentén – jelentősen meghaladhatja a környező területeken jellemző értéket. A nagyvárosokban gyakori jelenség a szilárd aeroszol részecskék alkotta ún. *száraz köd*.

A csapadékgyakoriság vonatkozásában a vizsgálatok eredményei nem teljesen egybehangzóak. A legtöbb tanulmány szerint *az összcsapadék mennyiségét a városi hatás növeli*. A csapadékösszeg növekedése *főként a város lee oldalán* figyelhető meg. Ez azzal magyarázható, hogy az erősen felmelegedő városközpont felett a legerősebb a konvekció, ami erősítheti a felhőképződést a város fölé érkező páradús légtömegekben. A csapadék aztán a város „mögötti” lee oldalon hullik. Hasonló okokkal magyarázható *a zivatarok nagyobb gyakorisága a városok környezetében*. A melegebb városi területeken ugyanakkor *csökken a hócsapadék gyakorisága, a hótakarós napok száma és a hótakaró átlagos maximális vastagsága* is. A csapadék jellegzetességeinek megváltozásában tehát a hősziget hatása érhető tetten.

2.5.3. A légmozgások módosulásai a beépített területeken

A beépített területeken a légmozgások iránya és sebessége is módosul. A szélsébség a nagyobb felszíni érdességből adódó erősebb sűrűdés következtében átlagosan 20–30%-kal csökken, a heves szellőkések sebessége 15–20%-kal kisebb, míg a szélcsend 5–20%-kal gyakoribb [2.70]. A szélirány a felszín közelében 1–10° eltérést mutat a városon kívüli területhez képest. Az épületsorok, utcák irányához igazodva jelentősebb eltérések is kialakulhatnak [2.4]. A városi „utcakanyonokban” a csatornahatás érvényesül, helyenként még növelve is a szélsébséget az „utca-kanyon” tengely mentén.

A városok saját szélrendszerét is létrehozhatnak. Derült, egyébként szélcsendes estén a városközpont felett, a városi hősziget hatására felmelegedő levegő kitágul, sűrűsége csökken, tehát felemelkedik, helyére a külterületek irányából hűvösebb, tisztább levegő áramolhat, ha a beépítés laza, sugárutas szerkezete engedi ezt (2.6. ábra). Ezt a légáramlást nevezzük *hősziget-légkörzésnek* vagy angol megnevezéssel (hiszen a szél arról az irányról kapja a nevét, amerről fúj) „country breeze”-nek. A központ felett feláramlott levegő a magasban szétáramlik, s lehűlve, növekvő sűrűsége következtében visszaereszkedik, ami által kisméretű Hadley-cellát hoz létre. A hősziget-légkörzés hatékonyságát rontja, hogy a légáramlás főképp a tetők, és nem az utcák magasságában mozog. A hősziget-légkörzés sajátos dinamikát mutat az éjszaka folyamán. A légáramlás a központ melegebb levegőjét elszállítja, a hőmérsékleti kontraszt tehát csökken, így a légmozgás gyengül vagy megáll. Ez a központ felmelegedését eredményezi, ami újraindítja a légcserét.



2.6. ábra. A városok saját szélrendszere

Forrás: [2.69]

A hősziget-légkörzés kifejezetten előnyös jelenségnek tekinthető a légszennyezettség és a humánkomfort javítása szempontjából, míg a szélsébség általános csökkenése inkább kedvezőtlen változásként ítéltető meg.

2.5.4. A városklíma hatásai

A hősziget jelentősen befolyásolja a városlakók komfortérzetét. Nyáron a város felmelegedése bioklimatológiai szempontból kifejezetten kedvezőtlen, elsősorban az alacsonyabb és a mérsékelt szélsségeken, télen ugyanakkor kifejezetten előnyös. Ezenkívül a magasabb városi hőmérséklet következtében *meghosszabbodik a fagymentes időszak* és a növények vegetációs időszaka. A növények fejlődési szakaszai (az ún. fenológiai fázisok) előbb következnek be, mint a hidegebb városon kívüli területeken. Az urbanizációs hatás a globális felmelegedés következményeivel együttesen akár hetekkel hozhatja előre a növények fejlődési fázisait a korábban egy adott területen jellemző fejlődési fázisokhoz képest. A beépített területeken mérséklődik *a fagyok erőssége*, kisebb a fagyos, téli és hótakarós napok száma, csökken továbbá az ún. fűtési napok száma, ami természetesen *mérsékli a fűtésre felhasznált energia mennyiségét is*. Ugyanakkor a hősziget hatására a légkondicionálásra fordított energiaszükséglet növekedhet a nyári időszakban.

Minél zártabb a beépítés, minél közelebb helyezkednek el a házak egymáshoz, annál inkább mérséklük a falfelületek kisugárzási hővesztességét, következésképp relatíve annál kevesebb fűtésienergia-felhasználásra van szükség. A 2.3. táblázat különböző elrendezésű családi házak esetében mutatja be ezt a viszonylagos különbséget.

2.3. táblázat. A relatív fűtési energiaszükséglet alakulása különböző épület elrendezések esetén

Házelrendezési típusok	Viszonylagos fűtési energiaigény
Sűrű elhelyezkedésű városi sorház	1,0
Nyílt elhelyezkedésű városi sorház	1,3
Szabadon álló ikerház	1,5
Szabadon álló családi ház, közel a másikhoz	1,7
Szabadon álló családi ház	2,1

Forrás: [2.69]

A városklímának az emberre irányuló komplex hatás együttese nem ítéhető meg egyértelműen pozitívan vagy negatívan. Télen elsősorban a sugárzási, nyáron inkább a hőmérsékleti viszonyok megváltozása hátrányos. Ennek megítélése jelentős mértékben függ attól, hogy az adott város milyen szélességi körön, illetve klimatikus régióban található.

Hűvösebb területeken a városi hősziget megítélése nyáron is kifejezetten pozitív. Szinte egész évben és minden területen kedvezőtlen a külterülethez képest csökkenő szélsőesség, viszont ugyanakkor a hősziget-cirkuláció pozitív megítélés alá esik. A légnedvesség eltérései viszonylag csekély hatással rendelkeznek.

A városi levegőkörnyezetben a meteorológiai állapotjelzők megváltozása a természetes területeken jellemzőhöz képest több terhelő hatást válthat ki, ami ronthatja az itt élők komfortérzetét. Ezek a hatások annál erősebbek, minél nagyobb a város, önmagukban azonban még nem tekinthetők egyértelműen károsnak az emberi egész-

ségre. Mindez a levegőszennyezéssel párosulva, amely akár százazres nagyságrendű városok esetében is igen jelentős lehet, már kimutatható egészségrombolást okozhat az élő szervezetekben.

A klíma, és a városklíma emberre gyakorolt hatásainak a vizsgálata a *humán bioklimatológia*, azon belül is a *kültéri humánkomfort-kutatás* tárgya. Eredményei segítségével pontos és részletes képet kaphatunk a különböző közterületek, pl. egy közpark, közkert, játszótér, vagy sétáló utca termikus komfort viszonyairól. Pontról pontra meghatározható, hogy hol, mekkora hőterhelés éri az adott környezetben tartózkodók szervezetét, milyen a kapcsolat egy terület látogatottsága (kihasználtsága) és klimatikus viszonyai között. A gyakorlat szintjén tehát ahhoz nyújt segítséget, hogy megállapíthassuk klimatikus (humánkomfort) szempontból egy terület kritikus részeit.

A település-, építész- és tájépítésmérnök szakemberekkel együttműködve a tervezés folyamatában e szempontok figyelembevételével hatékonyabb zöld felületi, szabadtér-építészeti és építészeti megoldásokat keresve lehet eljutni az optimális térkialakításhoz (megfelelő zöldfelület-arány, átszellőzés, természetes és mesterséges árnyékolók, csapadékvíz-visszatartás, lélegző burkolatok, vízepítéset) nemcsak az esztétikai, de a komfortviszonyok tekintetében is.

2.6. A városi hősziget kialakulását befolyásoló időjárási tényezők változékonysága Debrecen térségében 1961–2010 között

Amint a korábbiakban tárgyaltuk, a városi hősziget *általános* potenciális kifejlődését a település statikus, morfológiai jellemzői (nagyság, szerkezet, a beépítettség mértéke és geometriája stb.) határozzák meg, míg egy *konkrét* kifejlődését az adott napon előforduló, nagytérségi időjárási helyzetekbe ágyazódó dinamikus meteorológiai tényezők befolyásolják jelentősen [2.55] [2.89]. Erősen anticiklonális derült, szél- és csapadékmentes körülmények között fejlődik ki intenzíven, míg ciklonális időjárási helyzetek fennállásakor gyengén, vagy egyáltalán nem alakul ki. E fejezetben a vizsgálatunk célja, hogy éghajlati adatsorok elemzésével megállapítsuk, miként változott a hősziget kialakulása szempontjából kedvező és kedvezőtlen időjárási helyzetek gyakorisága az év egészében és annak egyes időszakában. A kedvező körülmények feltételezett trendszerű növekedése meghatározza a hőszigethatás erősödését az urbanizált területeken, amely közvetlenül befolyásolja a fűtési és légkondicionálási energia szükségletet.

2.6.1. Adatbázis és módszer

A vizsgálathoz felhasználtuk a nemzetközi szinten elismert módszerrel (Mish/Mash) homogenizált CarpatClim adatbázist, amely a Kárpát-medence éghajlati adatsorait tartalmazza napi felbontásban [2.90]. Az ötven éves periódust felölelő adatsorból a Debrecenhez legközelebb eső rácsközpont adatait használtuk, amely bőséges infor-

mációt nyújt – a városi hősziget vonatkozásában – a legfontosabb időjárási paraméterekről (csapadék, szélsébség, felhőzet, hőmérséklet és légnyomás).

A városi hősziget kialakulási feltételeinek definiálásakor három fontos paramétert vettünk figyelembe (csapadék, szélsébség, felhőzet), melyek a legmarkánsabban határozzák meg a jelenség kialakulását [2.91]. Ezekhez a tényezőkhöz küszöbértékeket rendeltünk, s a továbbiakban meghatároztuk a kedvező, közömbös, kedvezőtlen és rossz feltétel kategóriákat. Debrecen esetében a következő értékeknél húztuk meg a határokat: csapadék maximum 2 mm, szélsébség maximum 3 m/s, felhőzet maximum 5 okta. A határok meghúzásánál – a fent említett három paraméter esetében – a Debrecenben folytatott mérési kampányok szolgáltatották az egzakt információt a küszöbértékek kialakításánál [2.83], ami egybecsengett az Oke által alkotott empirikus egyenlet segítségével kalkulált értékekkel [2.87].

A vizsgálatok során a következő kérdésekre kerestünk választ:

- ♦ Az UHI számára kedvező feltételek gyakorisága növekszik vagy csökken?
- ♦ Kimutatható-e trendszerű változás a kedvező feltételek gyakoriságában?
- ♦ Meghatározható-e az idősorokat viszonylag homogén, egymástól szignifikáns szakaszokra tagoló töréspontok?

A városi hősziget kialakulását meghatározó időjárási feltételek gyakoriságának alakulását trendanalízissel vizsgáltuk (legkisebb négyzetek módszerével), amely alkalmas eljárás hasonló feladatok elvégzésére. A trendek feltárása érdekében meghatároztuk a korrelációt az adatsorok elemei és azok időbeli sorszáma között. A vizsgálatnál a paraméteres, illetve nemparaméteres korrelációt alkalmaztuk. Az előbbi típus feltételezi, hogy az összevetendő valószínűségi változó nem tér el a normális eloszlástól, a második típus esetében ez nem feltétel. A korrelációs együtthatók és az adott elemszám alapján eldöntöttük a növekvő trend szignifikanciáját.

A trendelemzésen túl töréspontokat is kerestünk a városi hősziget kialakítását meghatározó különböző feltételek időbeli változásában. A feladat elvégzésére a statisztikai szakirodalom által ajánlott Student-féle t -próbát alkalmaztuk [2.92] [2.93]. A vizsgálat azon a feltevésen alapul, hogy az ugrásszerű változás időpontjánál elválasztott időszakok átlagának eltérése nagyobb a más időpontokban elválasztottakénál. A részátlagok összevetésére a t -értéket használtuk. Megjegyezzük, hogy a t -próba alkalmazhatósága az összehasonlítandó minták normális eloszlásához kötött. Az elvégzett Kolmogorov-Szmirnov-próba alapján az évi átlagos arányértékek eloszlása a vizsgált periódus alatt a normálistól szignifikánsan nem tért el.

A vizsgálatok kiterjedtek a városi hőszigetre kedvező gyakoriságok jellemzőinek ötven éves idősoraiban jelentkező lineáris trendek és az ezeket elválasztó töréspontok feltárására. Annak eldöntésére, hogy a végbement változásokat melyik módszer segítségével írhatjuk le pontosabban, vagyis azok fokozatosan vagy ugrásszerűen zajlottak-e le, az eltérések négyzetösszegeinek módszerét alkalmaztuk [2.94] [2.95].

Ennek érdekében meghatároztuk az adott idősorra fektetett lineáris trendegyenes x_i értékeit az $i = 1, 2, \dots, n$ évekre, majd az egyes évek x_i értékeiből kivontuk azokat. Az eltérések négyzeteit összeadva kapott szám (S_{tr}) jellemzi a trend egyenes illeszkedésének jóását: a kisebb értékek jobb illeszkedésnek felelnek meg.

$$S_{tr} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_{ti})^2. \quad (2.10)$$

A következő lépésben kiszámoltuk az idősor legmarkánsabb, k és $k + 1$ közé eső töréspontja által kijelölt két szakasz átlagos értékét (\bar{x}_1 és \bar{x}_2). Az egyes évi értékek megfelelő részátlagtól vett eltéréseinek négyzetösszegét képeztük:

$$S_{tp} = \sum_{l=1}^k (x_l - \bar{x}_1)^2 + \sum_{m=k+1}^n (x_m - \bar{x}_2)^2, \quad (2.11)$$

ahol x_l a töréspont által elválasztott egyik részidőszak értékei az $l = 1, 2, \dots, k$ évekre, míg az x_m a töréspont által kijelölt másik részidőszak értékei az $m = k + 1, k + 2, \dots, n$ évekre.

Az eltérések kisebb négyzetösszege a jobb illeszkedésre utal. Az illeszkedések jósa-gának összehasonlítására a két négyzetösszeg arányát alkalmaztuk:

$$g = \frac{S_{tr}}{S_{tp}}. \quad (2.12)$$

Ha $g < 1$, akkor a lineáris trend illeszkedik jobban, ha pedig $g > 1$, akkor a töréspontok által elválasztott átlagoknak jobb az illeszkedése.

2.6.2. Eredmények

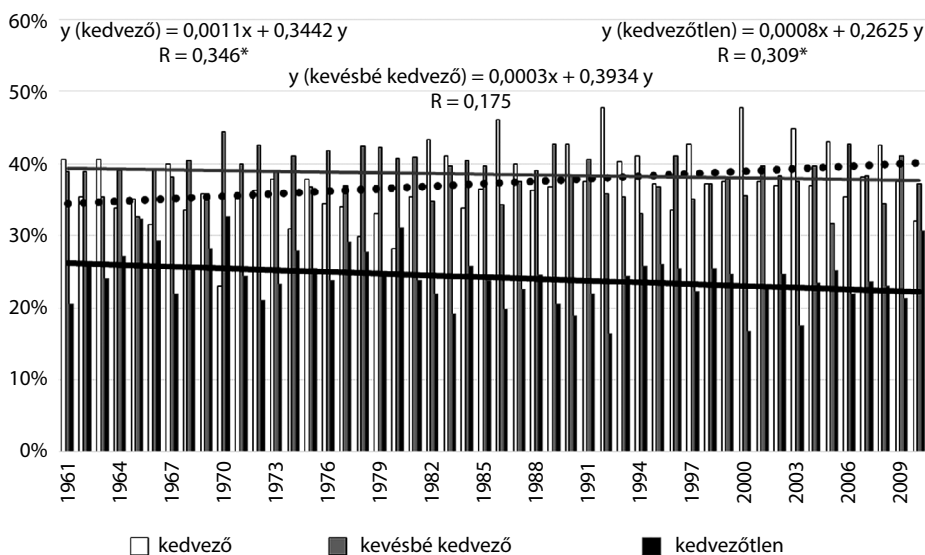
A városi hőszigetet meghatározó feltételek előfordulásának gyakorisága a vizsgált időszakra vonatkozóan a következőképpen alakult:

- ♦ kedvező feltételek (**1. kategória**): 37,35%-ban fordultak elő, amikor egyik időjárási tényező sem akadályozta a hősziget kialakulását és az feltehetően maximálisan ki is tudott fejlődni;
- ♦ kevésbé kedvező feltételek (**2. kategória**): 38,46%-ban fordultak elő, amikor valamely időjárási tényező negatívan befolyásolhatta az UHI kialakulását, azonban mégis kialakulhatott közepes, vagy gyenge erősségű városi hősziget;
- ♦ kedvezőtlen feltételek (**3. kategória**): 20,88%-ban jelentek meg, melyek során két időjárási tényező is akadályozta a városi hősziget kifejlődését. Ebben az esetben a városi hősziget csak gyengén fejlődhetett ki, vagy az egyáltalán nem jött létre;
- ♦ teljesen kedvezőtlen feltételek (**4. kategória**): amikor biztosan nem alakulhatott ki a városi hősziget (az esetek mindössze 3,32%-a).

Megjegyezzük, hogy a 4. kategóriát annak igen csekély gyakorisága miatt össze-vontuk a 3. kategóriával. A két csoport összevonását azzal indokoljuk, hogy közöttük jelentős különbség nem adódott a városi hősziget kifejlődésének vonatkozásában.

A lineáris trendelemzés az UHI-ra kedvező feltételek adatsorában szignifikáns emelkedő trendet talált. A Pearson-féle korrelációs együttható értéke meghaladta a 95%-os szignifikancia szintnek megfelelő 0,27-es értéket (2.7. ábra). Módszertani

megfontolásból meghatároztuk a nemparaméteres Spearman-féle korrelációs együtthatót is, amelyre ugyancsak szignifikáns trend adódott (0,28). Az alkalmazott lineáris modell a vizsgált 1961–2010 időszakra vetítve kedvező feltételek esetében 4%-os emelkedést jelez. Az elemzés során a kevésbé kedvező kategóriában nem találtunk statisztikailag kimutatható csökkenést, azonban a kedvezőtlen típusban a korrelációs együttható értéke egyértelművé teszi a szignifikáns csökkenő trendet, ami az alkalmazott lineáris egyenletben 2,2%-os csökkenést jelent.

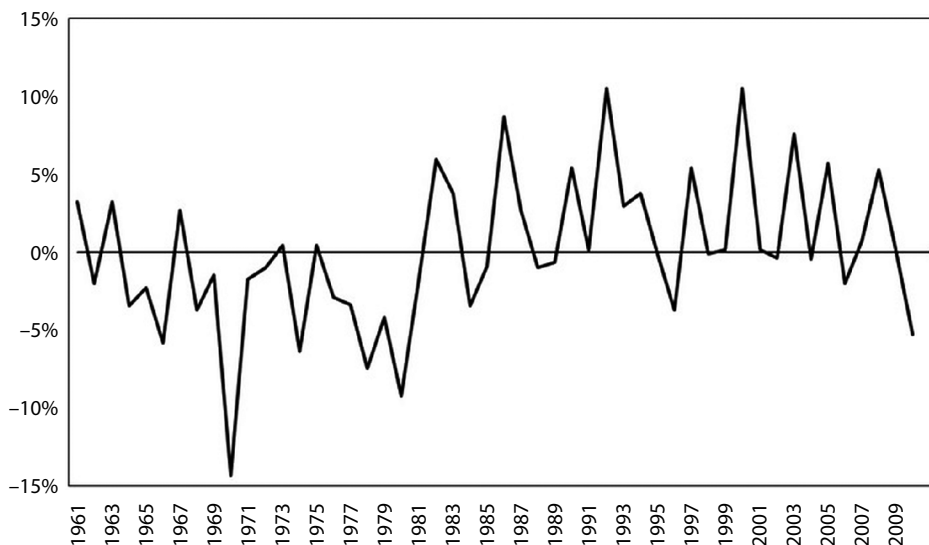


2.7. ábra. Az UHI kialakulását meghatározó feltételek gyakorisága Debrecen térségében 1961 és 2010 között

A vizsgálat folyamán meghatároztuk a kedvező feltételek gyakoriságának anomália értékeit, amelyeket az ötven éves periódus átlagából származtattunk.

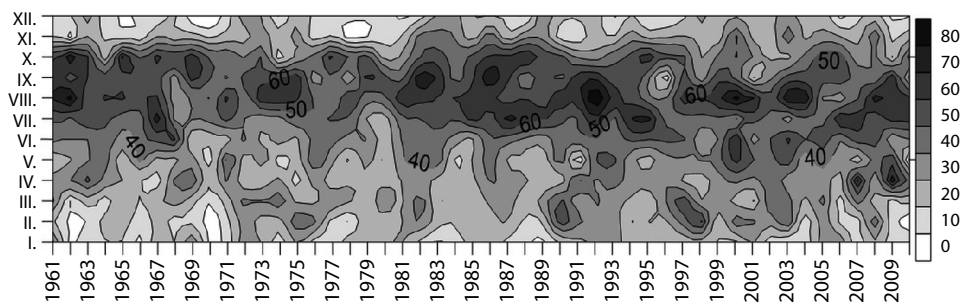
A 2.11. ábrán jól látható, hogy a kedvező feltételek gyakoriságának 1964–1980 között negatív trendet mutat túlnyomóan átlag alatti értékekkel, míg 1981–2009 között átlag fölötti gyakoriságok a jellemzők jelentős ingadozásokkal. A negatív irányú eltérések leghangsúlyosabbak 1970-ben (–15%) és 1979-ben (–10%). Erős negatív anomália tapasztalható 2010-ben, azonban ez csak 5,3%-nak adódik. Ez azzal magyarázható, hogy rekord mennyiségű csapadék hullott ebben az évben. A kedvező feltételek esetében a pozitív anomáliák főként 1981-től figyelhetők meg, 1992-ben és 2000-ben 10% feletti maximum értékekkel.

Elemeztük a kedvező feltételek gyakoriságának növekedését évszakos vonatkozásban is. A tavasz és a nyár szignifikáns trendszerű emelkedést produkált kedvező feltételek esetén. Az emelkedés mértéke nyáron erősebb (5,6%), míg a tavasszal mérsékeltebb (3,8%). A tél és az ősz nem mutatott számottevő növekedést a kedvező feltételek gyakoriságában, amit az alacsony korrelációs együtthatók jeleznek (tél $r = 0,252$; nyár $r = -0,12$).



2.8. ábra. A kedvező feltételek előfordulásának anomália értékei 1961–2010 között, %

A kedvező feltételek (Kef, 1. kategória) előfordulásának gyakoriságát elemeztük havi és éves bontásban egyaránt. A vizsgált periódusban a kedvező feltételek előfordulásának átlagos minimális értéke (19,3%) decemberben figyelhető meg, míg annak átlagos maximális értéke (59,5%) augusztusban tapasztalható. Az abszolút maximális érték 1992 augusztusában adódott, amikor a hősziget a hónap 93,5%-ban kedvező feltételek mellett alakulhatott ki. Az abszolút minimális értékek a vizsgált periódusban először 1970 decemberében, másodszor 1978 novemberében fordultak elő 0%-kal.



2.9. ábra. A kedvező feltételek gyakoriságának havi eloszlása az 1961 és 2010 közötti periódusban

A kedvező feltételek gyakoriságának havi járásában megfigyelhetőek elenyésző és markáns különbségek egyaránt (2.9. ábra). A téli hónapokban a Kef-gyakoriságok 19–28 százalék között ingadoznak, az átlagtól való eltérések legalacsonyabb értéke (9%) januárban adódik. A tavaszi hónapokban az átlagos kedvező feltétel gyakoriságok között minimális különbség adódik, mindössze 4%. A legnagyobb eltérések Kef-

előfordulásában a nyári időszak hónapjaiban adódnak, a különbségek elérhetik 17%-ot is. A hónapok közül kiemelendő az augusztus, hiszen a gyakorisági maximum értékek itt fordulnak elő, valamint a legnagyobb átlagos gyakoriságtól való eltérések is itt figyelhetők meg. Az őszi hónapok közül a szeptember produkál legmagasabb gyakorisági értékeket, valamint az 50 éves periódusban itt adódik a legnagyobb szórásérték is.

A következő lépésben azt vizsgáljuk meg, vajon milyenek Debrecen esetében Kef-gyakoriságok havi értékeinek trendjei.

A havi trendek nem minden esetben követik szorosan a szezonálisakat. A tél nem jelzett trendszerű növekedést a kedvező feltételek vonatkozásában, azonban februárban már az emelkedés valószínűsíthető 95%-os biztonsággal. Ezzel szemben a december és a január esetében a trendelemzés során nem mutatható ki statisztikailag a Kef-gyakoriságok trendszerű növekedése.

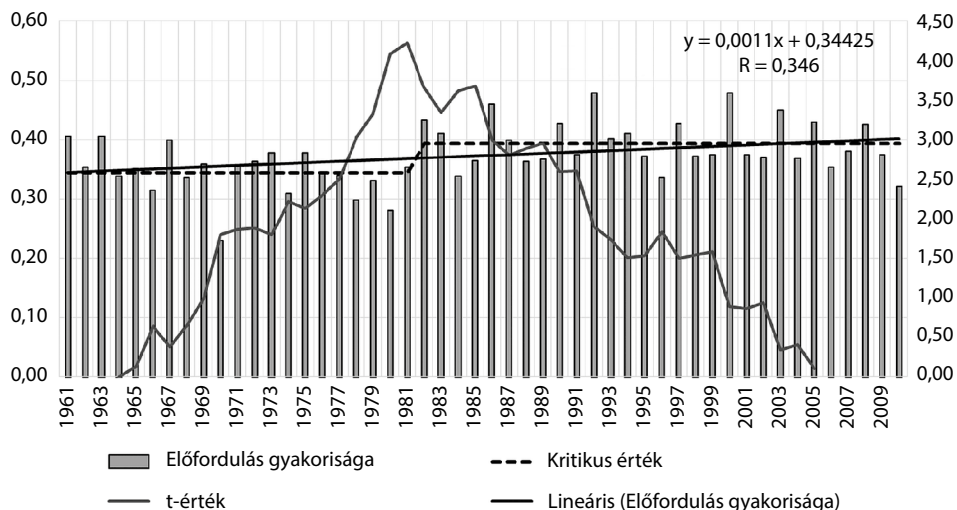
A tavasz vonatkozásában erős gyakoriságnövekedés adódott, míg havi bontásban a március és május esetében stagnálás figyelhető meg, míg jelzésértékű emelkedés csak áprilisban állapítható meg. A nyári hónapok közül csak a június produkált szignifikáns emelkedést, meglepő módon a július és az augusztus esetében a gyakoriságok stagnáló tendenciát mutatnak. Az őszi hónapok közül a november vált kedvezőbbé a városi hősziget kialakulása tekintetében, a másik két hónap csak stagnáló értékeket produkált. Megjegyezzük, a Spearman korrelációs együtthatók értékei az évszakos és a havi adatsorok elemzésénél is megerősítették a Pearson-féle r -értékek alapján feltárt szignifikanciákat.

A trendek elemzésén túl elvégeztünk töréspontanalízist is. A Student-féle t -próba segítségével végrehajtott töréspontvizsgálat az évi Kef-értékek adatsorában szignifikáns töréspontot mutatott ki 1981/82 fordulóján (2.10. ábra.). A töréspont által elválasztott szakaszátlag eltérése több mint 5%-os emelkedést jelez. Kiterjesztve a töréspont elemzést az évszakos gyakorisági értékekre az 1970–1990-es időszakban szignifikáns töréspontokat találtunk az őszi kivételével mindegyik időszorban. A detektált töréspontok után emelkedtek az évszakos gyakorisági értékek. A legmarkánsabban nyáron (8%), és tavasszal (7%), a legkevésbé télen 4%-os értékel, ami közelít az éves emelkedéshez.

Az alkalmazott t -próbás módszer a havi gyakorisági átlagok idősoraiban töréspontokat detektált. Kivételt képeztek a téli hónapok közül a január és a február. A töréspontok által elválasztott szakasz átlagok különbsége többségében pozitív ugrásszerű növekedést mutatott, amelynek értékei 5–14% között váltakoznak. Kiemelendő, hogy két hónap esetében (Szeptember, Október) negatív átlagkülönbségek adódtak. A havi töréspontok a június és a július esetében szinkronban vannak az évvel. Hasonló egybeesések figyelhetők meg évszakos összehasonlításban is.

A fent említett eredményekből kitűnik, hogy Debrecen térségében, a városi hősziget potenciális kedvező feltételeinek gyakorisági előfordulásában végbementek jelzésértékű változások a vizsgált időszak alatt. Azonban ezek a változások a vizsgált módszerek vonatkozásában két módon értelmezhetőek: ugrásszerűen vagy folyamatosan végbemenőek voltak. Ennek eldöntésére, az eltérések négyzetösszegeinek összehasonlítást végeztük el.

A városi hősziget kialakulása szempontjából kedvező helyzetek éves gyakoriságának esetében elvégezve a 2.6.1. fejezetben leírt g -értékek meghatározását, azt egynél nagyobbak találtuk ($g = 1,21$), ami a folyamat diszkrét jellegét támasztja alá.



2.10. ábra. A városi hősziget kialakulására kedvező feltételek gyakoriságának trend- és töréspontvizsgálata

Az évszakos átlagok elemzését elvégezve, hasonló eredmények adódtak, bár valamivel alacsonyabb g-értékekkel az éveshez képest. A hónapok közül az ősz volt eltérő, hiszen nem detektáltunk egyik módszerrel sem Kef-gyakorisági növekedést. A tél esetében csak a töréspontvizsgálat mutatott jelzés értékű növekedést a gyakoriságok vonatkozásában, ami egyúttal azt jelenti, hogy szakaszos emelkedés zajlott le. A nyár esetében adódott a legmagasabb g-érték (1,18), ami szintén a szakaszos emelkedést emeli ki, ugyancsak ez figyelhető meg a tavasz esetében is.

A havi Kef-gyakoriságok vizsgálata ugyancsak inkább a változások szakaszos jellegét valószínűsítette minden esetben – ahol detektáltunk trendeket és töréspontokat – ezek az értékek 1,01–1,2 között váltakoztak.

Az városi hősziget kialakulására kedvező feltételek gyakoriságának feltárt lépcsőzetes jellege annak lehet a következménye, hogy a szakaszosan jelentkező éghajlat-alakító tényezők hatása megjelenik, tükröződik az eredményekben.

2.6.3. Következtetések

A városi hősziget kialakulására gyakorolt hatásuk alapján a szélsébség, felhőzet és csapadék kritikus értékeinek figyelembevételével 4 kategóriába soroltuk a nagytérségi időjárási helyzeteket a kedvezőtlenről a kedvezőig. Meghatároztuk az egyes kategóriák előfordulási gyakoriságát az ötvenéves adatsoron belül. Az esetek több mint 75%-ában mérsékelten kedvező vagy kedvező feltételek uralkodtak a városi hősziget kialakulása szempontjából, összhangban az anticiklonális nagytérségi időjárási helyzetek nagyobb gyakoriságával.

Az UHI kifejlődése szempontjából meghatározó tényezők ötvenéves idősorát vizsgálva, a kedvező szinoptikus feltételek gyakoriságának növekedését tételeztük fel. A hi-

potézis realitását trendanalízissel vizsgáltuk meg. A lineáris trendanalízis szignifikáns növekvő trendet tárt fel a kedvező feltételek gyakoriságára vonatkozóan, amit mind a lineáris Pearson, mind a nemlineáris Spearman korrelációs együtthatók megerősítettek. A vizsgált időszakban 4%-kal nőtt a kedvező feltételek gyakorisága párhuzamosan a kedvezőtlen feltételek gyakoriságának csökkenésével.

A kedvező feltételek előfordulási gyakoriság anomáliáit is tanulmányoztuk, megállapítva, hogy az átlagnál kisebb gyakoriságok főként az 1964 és 1980 közti időszakot jellemezték, míg az 1981 és 2009 közti időszakot pozitív anomáliák uralják.

Évszakos és havi bontásban is megvizsgáltuk a kedvező feltételek gyakoriságának változásait. A tavasz és a nyár esetében mutatható ki szignifikáns növekedés, míg az ősz és a tél esetében erről nincs szó. A legkisebb ötvenéves átlagos kedvező feltétel előfordulási gyakoriságot a december érte el 19,3%-os értékkel, míg Augusztusban az esetek 59,9%-ában kedvező feltételek uralkodtak a városi hősziget kifejlődése szempontjából Debrecen térségében.

A kedvező helyzetek havi gyakorisági trendjét vizsgálva megállapítható, legerőteljesebb változás (14%-os) a február produkálta. Ugyancsak érdekes, hogy a tavasz minden hónapjában, ami a helyi klíma kialakulására a legkedvezőtlenebb időszak szokott lenni, 9–11% között mozgó ugrásszerű emelkedés adódott. A nyári hónapokban a kedvező feltételek gyakorisága jelzésértékűen növekedett. Ezzel szemben az őszi hónapokban szignifikáns csökkenés mutatható ki, kivéve a novembert, ahol 10%-os növekedést detektáltunk.

A kedvező helyzetek gyakoriságának ötvenéves adatsorát vizsgálva 1981–1982 között szignifikáns töréspontot mutattunk ki a Student-féle t -próba segítségével. A töréspont után a havi gyakoriságok szignifikánsan növekedtek, különösen tavasszal és nyáron.

A megfigyelt tendenciák előnytelene, mivel a hősziget kialakulása szempontjából kedvező feltételek gyakorisága főként a nem fűtési félévben növekedett, így nem járul hozzá a fűtési energiaszükséglet csökkentéséhez, ugyanakkor szerepet játszhat a légkondicionálási energiaszükséglet növekedésében a nyári időszakban.

Irodalom

- [2.1] Makra, L.–Brimblecombe, P.: Selections from the history of environmental pollution, with special attention to air pollution. Part 1. *International Journal of Environment and Pollution*, 2004, Vol 22, Issue 6, 641–656.
- [2.2] Brimblecombe, P.–Makra, L.: Selections from the history of environmental pollution, with special attention to air pollution. Part 2: From medieval times to the 19th century. *International Journal of Environment and Pollution*, 2005, Vol 23, Issue 4, 351–367.
- [2.3] Howard L.: The climate of London. 1818. <http://urban-climate.com/wp3/resources/classic-texts/luke-howard-the-climate-of-london>
- [2.4] Bridgman, H.–Oliver, J.: The Global Climate System. University Press, Cambridge, 2006, 205–243.
- [2.5] Landsberg, H. E.: The Urban Climate. Academic Press, New York–London–Toronto–Sydney–San Francisco, 1981, 83–126.

- [2.6] Nouel, E.: Notice sur la vie et les travaux de M. Emilien Renou, directeur de l'Observatoire du Parc Saint-Maur: par M. Ernest Nouel, F. Empaytaz, Paris, 1902
- [2.7] Kremser, V.: Ergebnisse vieljähriger Windregistrierungen in Berlin (The results of wind measurements recorded over many years in Berlin). *Meteorologische Zeitschrift*, 1909, Vol. 26, 259–265.
- [2.8] Schmauss, A.: Singularitäten im jährlichen Witterungsverlauf von München. In: Deutsches Meteorologisches Jahrbuch. München, 1928
- [2.9] Schmidt, W. Meteorologische Feldversuche über Frostabwehrmittel. Wien, 1929 figs. 30% cm. (Anhang zu den Jahrb. Der Zentralanst. für Met. und Geod. Jahrg. 1927. Pub. Nr. 135.)
- [2.10] Kratzer, A.: Das Stadtklima. Wissenschaft 90, Vieweg F. & Sohn, Braunschweig, Germany, 1937
- [2.11] Chandler T. J.: Selected Bibliography on Urban Climate [WMO Technical Paper No. 155] World Meteorological Organization, Geneva, 1970
- [2.12] Szepesi D.–Schirokné Kriston I.: A városi levegőkörnyezet tervezésének aktuális kérdései. Első városklíma munkaértekezlet, 1998, 11–16.
- [2.13] Makra, L.–Bérczi, R.–Motika, G.–Mayer, H.: Assessment of the Air Quality in a Middle – Sized City, Szeged, Hungary. In: Klysik, K.–Oke, T. R.–Fortuniak, K.–Grimmond, C. S. B.–Wibig, J. (ed.) Proceed. Fifth Int. Conf. on Urban Climate. Vol. 1. University of Lodz, Lodz, Poland, 2003, 157–160.
- [2.14] Makra, L.–Sánta, T.–Matyasovszky, I.–Damialis, A.–Karatzas K.–Bergmann, K. C.–Vokou, D.: Airborne pollen in three European cities: Detection of atmospheric circulation pathways by applying three-dimensional clustering of backward trajectories. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2010, 115 – D24220, doi: 10.1029/2010JD014743
- [2.15] Makra, L.–Matyasovszky, I.–Guba, Z.–Karatzas, K.–Anttila, P.: Monitoring the long-range transport effects on urban PM10 levels using 3D clusters of backward trajectories. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(16) 2630–2641.
- [2.16] Makra, L.–Ionel, I.–Csépe, Z.–Matyasovszky, I.–Lontis, N.–Popescu, F.–Süsmeghy, Z.: Characterizing and evaluating the role of different transport modes on urban PM10 levels in two European cities using 3D clusters of backward trajectories. *Science of the Total Environment*, 2013, 458–460, 36–46
- [2.17] Sansone, M.–Pernigotti, D.–Bressan, M.–Roosa, A.–Ferrario, M.: A multiple regression approach to forecasting PM10 concentration for the city of Padua, Italy. In: 6th International Conference on Urban Climate Göteborg, Sweden, Preprints. University of Göteborg, 2006, 128–131.
- [2.18] Weber, S.: Variability of fine particle concentrations within a busy street canyon. In: 6th International Conference on Urban Climate Göteborg, Sweden, Preprints. University of Göteborg, 2006
- [2.19] Makra, L.–Pálfi, S.: Intra-regional and long-range ragweed pollen transport over southern Hungary. *Acta Climatologica et Chorologica Universitatis Szegediensis*, 2007, Tom. 40–41, 5–15.
- [2.20] Adegoke, J.–Balogun, A.–Vezhapparampu, S.–Mauder, M.: Urban surface energy and moisture flux measurements in the Kansas city metropolitan area (KC-FLUXMEX). In: 6th International Conference on Urban Climate Göteborg, Sweden, Preprints. University of Göteborg, 2006, 32–35.
- [2.21] Arnfield, A. J.: Surface controls on exchanges of sensible heat between the urban surface and its boundary layer: results based on simulation experiments. In: 6th International Conference on Urban Climate Göteborg, Sweden, Preprints. University of Göteborg, 2006, 312–315.
- [2.22] Krayenhoff, E. S.–Voogt, J.: Combining sub-facet scale urban energy balance and sensor-view models to investigate effective thermal anisotropy. In: 6th International Conference on Urban Climate Göteborg, Sweden, Preprints. University of Göteborg, 2006, 557–561.

- [2.23] Lopes, A.: Local Wind Changes with Different Roughness Simulated in a Wind Tunnel: An Example of Application to a City District in North of Lisbon. In: Klysik, K., T. R. Oke, K. Fortuniak, C. S. B. Grimmond, J. Wibig (ed.) Proceed. Fifth Int. Conf. on Urban Climate. Vol. 1. University of Lodz, Lodz, Poland, 2003, 439–442.
- [2.24] Weber, S.–Kuttler, W.: Cold-Air Dynamics of Railway Tracs with Regard to Urban Ventillation – A Case Study in Consideration of the Surface Energy Balance. In: Klysik, K., T. R. Oke, K. Fortuniak, C. S. B. Grimmond, J. Wibig (ed.) Proceed. Fifth Int. Conf. on Urban Climate. Vol. 2. University of Lodz, Lodz, Poland, 2003, 475–478.
- [2.25] Shiguang, M.–Pigyang, L.–Xiaoyun, W.: Building morphological characteristics and its effect on the wind in Beijing. In: 6th International Conference on Urban Climate Göteborg, Sweden, Preprints. University of Göteborg, 2006, 412–414.
- [2.26] Pongrácz, R.–Bartholy, J.–Dezső, Zs.–Barcza, Z.: Satellite-based analysis of urban heat island effects for large cities in the Carpathian Basin. In: Proceedings, the 6th Hellenic Conference in Meteorology, Climatology, Atmospheric Physics. (ed. A. Bartzokas) p. 6, CD-ROM. Univ. of Ioannina, 2002
- [2.27] Dezső, Zs.–Bartholy, J.–Pongrácz, R.–Barcza, Z.: Application and Problems of Remotely Sensed Thermal Information to Urban Climatology. In: Klysik, K., T.R. Oke, K. Fortuniak, C. S. B. Grimmond, J. Wibig (ed.) Proceed. Fifth Int. Conf. on Urban Climate. Vol. 1. University of Lodz, Lodz, Poland, 2003, 315–318.
- [2.28] Dousset, B.–Gourmelon F.: Under the 2003 heat wave: surface temperature variability of the Paris basin from time series satellite images. In: 6th International Conference on Urban Climate Göteborg, Sweden, Preprints. University of Göteborg, 2006, 573–576.
- [2.29] Crawford, B.–Grimmond, S.: Investigations of Anthropogenic Heat Flux Using a Physical Model and Real World Observations. In: Klysik, K., T. R. Oke, K. Fortuniak, C. S. B. Grimmond, J. Wibig (ed.) Proceed. Fifth Int. Conf. on Urban Climate. Vol. 1. University of Lodz, Lodz, Poland, 2003, 169–172.
- [2.30] Mailhot, J.–Belair, S.–Lemonsu, A.: An overview of urban modelling at the Meteorological Service of Canada. In: 6th International Conference on Urban Climate Göteborg, Sweden, Preprints. University of Göteborg, 2006, 419–421.
- [2.31] Krayenhoff, E. S.–Voogt, J.: A micro-scale 3-D energy balance model for studying surface temperature. In: 6th International Conference on Urban Climate Göteborg, Sweden, Preprints. University of Göteborg, 2006, 308–311.
- [2.32] Unger, J.–Balázs, B.–Sümegehy, Z.–Gál, T.: Multiple variable model for estimating the maximum UHI using 2 and 3 dimensional surface parameters. In: 6th International Conference on Urban Climate Göteborg, Sweden, Preprints. University of Göteborg, 2006, 334–337.
- [2.33] Voogt, J.–Krayenhoff, E. S.: Measured and modeled urban thermal anisotropy. In: 6th International Conference on Urban Climate Göteborg, Sweden, Preprints. University of Göteborg, 2006, 553–556.
- [2.34] Balázs, B.–Geiger, J.–Sümegehy Z.: Annual mean urban heat island versus 2D surface parameters: modelling, validation, and extension. *Acta Climatologica et Chorologica Universitatis Szegediensis*, 2007, Tom. 40–41, 5–15.
- [2.35] Molnár J.: 2007. A városi hősziget és annak kapcsolata a főbb felszínparaméterekkel Beregszász példáján. In: Tóth T.–Kircsi A. (ed.) Kedvező széllel Kunhegyestől Debrecenig. Tiszteletkötet Dr. Tar Károly 60. születésnapjára. Debrecen, 225–233.
- [2.36] Probáld F.: A levegőkörnyezet humánkomfortjának tervezése – a levegőkörnyezet tervezése. Szerk. Szepesi D. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1981.
- [2.37] Molnár K.: Időjárási stressz a nagyvárosokban. *Természet Világa*, 1998, 129. évf. I. külön-szám, 90–94.
- [2.38] Ait-Ameur, K.: The influence of climatic factors on the wellbeing of the individual in outdoors spaces. In: 3rd European Conference on Applied Climatology (CD-Rom), 2000.

- [2.39] Jendritzky, G.: The assessment of human thermal climates in cities. In: 3rd European Conference on Applied Climatology (CD-Rom), 2000
- [2.40] Jendritzky, G.: Human bioclimate maps for climate impact research. In: 3rd European Conference on Applied Climatology (CD-Rom), 2000
- [2.41] Andrade, T.–Freire, T.–Nery, J.–Katzschner, L.: Thermal comfort studies in a humid tropical city. In: 6th International Conference on Urban Climate Göteborg, Sweden, Preprints. University of Göteborg, 2006, 234–237.
- [2.42] Johansson, E.–Rohinton, E.–Roselund, H.: The influence of urban design on outdoor thermal comfort in the hot-humid city of Colombo Sri Lanka. In: 6th International Conference on Urban Climate Göteborg, Sweden, Preprints. University of Göteborg, 2006, 217–220.
- [2.43] Katzschner, L.: A simplified method to derive thermal comfort conditions in open spaces. In: 6th International Conference on Urban Climate Göteborg, Sweden, Preprints. University of Göteborg, 2006, 201–204.
- [2.44] Petralli, M.–Morabito, M.–Cecchi, L.–Torrigiani, T.–Bartolini, G.–Orlandini, S.: Relationship between emergency calls and hot days in summer 2005 (Florence – Italy). In: 6th International Conference on Urban Climate Göteborg, Sweden, Preprints. University of Göteborg, 2006, 230–233.
- [2.45] Rohinton, E.–Roselund, H.–Johansson, E.: Urban morphology manipulation to promote climate-sensitive urban design in the tropics: the case of Colombo, Sri Lanka. In: 6th International Conference on Urban Climate Göteborg, Sweden, Preprints. University of Göteborg, 2006, 509–512.
- [2.46] Shript, S.–Potchter, O.–Bar (Kutiel), P.–Yaakov, Y.: Micro-climate behavior in urban parks located at a hot arid climate zone. The case study of Beer-Sheva, Israel. In: 6th International Conference on Urban Climate Göteborg, Sweden, Preprints. University of Göteborg, 2006, 250–253.
- [2.47] Toudert, F. A.–Mayer, H.: Street Design and Thermal Comfort in Hot and Dry Climate. In: Klyzik, K., T. R. Oke, K. Fortuniak, C. S. B. Grimmond, J. Wibig (ed.) Proceed. Fifth Int. Conf. on Urban Climate. Vol. 1. University of Lodz, Lodz, Poland, 2003, 207–210.
- [2.48] Cohen, P.–Potchter, O.–Bitan, A.: The correlation between climatic conditions in different designed urban parks and their pattern of use. In: 6th International Conference on Urban Climate Göteborg, Sweden, Preprints. University of Göteborg, 2006, 262–265.
- [2.49] Coutts, A.–Berlinger, J.–Tapper, N.: Impact of urban planning strategies on regional climate: a case study of Melbourne 2030. In: 6th International Conference on Urban Climate Göteborg, Sweden, Preprints. University of Göteborg, 2006, 517–520.
- [2.50] Spronken-Smith R.A. and Oke T. R.: The thermal regime of urban park sin two cities with different summer climates. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, Vol 19, Issue 11 July 1998, 2085–2104.
- [2.51] Bacci, L.–Rapi, B.–Battista, P.: Analysis of urban heat island of Florentine area (Italy) and application of different biometeorological indices. In: 3rd European Conference on Applied Climatology (CD-Rom), 2000
- [2.52] Shashua-Bar, L.–Potchter, O.–Bitan, A.–Boltansky, D.–Yaakov, Y.: Climatic performance of urban trees under various building heights and destines in the Mediterranean Climate – an empirical and analytical study in Tel Aviv. In: 6th International Conference on Urban Climate Göteborg, Sweden, Preprints. University of Göteborg, 2006, 246–249.
- [2.53] Probáld F.: Budapest városklímája. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1974, 7–13.
- [2.54] Miklósi Cs.: A városi hősziget vizsgálata Budapesten. *Légekör*, 1981, 26. évf. 3, 21–22.
- [2.55] Unger, J.: Heat island intensity with different meteorological conditions in a medium-sized town: Szeged, Hungary. *Theor. Appl. Climatology*, 1996, 54, 147–151.
- [2.56] Unger J.: A szegedi városklímakutatás eddigi eredményei. Első városklíma munkaértekeztet, 1998, 58–59.

- [2.57] Unger J.–Pál V.–Süsmeghy Z.–Kádár E.–Kovács L.: Maximális kifejlődésű városi hősziget területi kiterjedése tavasszal Szegeden. *Léggör*, 1999, 44. évf. 3. 34–37.
- [2.58] Mayer, H.–Makra, L.–Kalberlah, F.–Ahrens, D.–Reuter, U.: Air stress and air quality indices. *Meteorologische Zeitschrift*, 2004, 13, 395–403.
- [2.59] Makra, L.–Juhász, M.–Borsos, E.–Bécsi, R.: Meteorological variables connected with airborne ragweed pollen in Southern Hungary. *International Journal of Biometeorology*, 2004, 49(1) 37–47.
- [2.60] Makra, L.–Juhász, M.–Bécsi, R.–Borsos, E.: The history and impacts of airborne Ambrosia (Asteraceae) pollen in Hungary. *Grana*, 2005, 44(1) 57–64.
- [2.61] Eötvös, T.–Makra, L.: Chemical and biological air pollutants, as parameters of complex air quality indices. *Acta Geographica Debrecina Landscape & Environment Series*, in Press
- [2.62] Juhos, I.–Makra, L.–Tóth, B.: Forecasting of traffic origin NO and NO₂ concentrations by Support Vector Machines and neural networks using Principal Component Analysis. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2008, 16(9) 1488–1502.
- [2.63] Juhos, I.–Makra, L.–Tóth, B.: The behaviour of the multi-layer perceptron and the support vector regression learning methods in the prediction of NO and NO₂ concentrations in Szeged, Hungary. *Neural Computing and Applications*, 2009, 18(2) 193–205.
- [2.64] Gyöngyösi, A. Z.–Weidinger, T.–Makra, L.–Baranka, Gy.: Application of a dispersion model for Szeged, a medium sized Hungarian city: a case study. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2009, 18(5B) 788–797.
- [2.65] Makra, L.–Mayer, H.–Mika, J.–Sánta, T.–Holst, J.: Variations of traffic related air pollution on different time scales in Szeged, Hungary and Freiburg, Germany. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2010, 35(1–2) 85–94.
- [2.66] Justyák J.–Tar K.: Debrecen éghajlata. KLTE, Debrecen, 1994, 114–130.
- [2.67] Szegedi S.: A városi hősziget vizsgálata Debrecenben és jellegzetes méretű hajdúsági településeken. Habilitációs értekezés DE TEK TTK Meteorológiai Tsz., 2008
- [2.68] Roncz B.: Városklíma-mérések Egerben. *Léggör*, 1984, 30. évf. 3, 31–33.
- [2.69] Unger, J.: Lokális és mikroklimák. JATE TTK, Éghajlattani és Tájföldrajzi Tanszék, Szeged, 1997, 135–153.
- [2.70] Tőkei L.: Városklíma. In: Szász G.–Tőkei L. (ed.) Meteorológia. Mezőgazda Kiadó, Budapest, 1997, 219–236.
- [2.71] Unger J.–Süsmeghy Z.: Környezeti klimatológia. JATEPress, Szeged, 2002, 132–196.
- [2.72] Rózsa P.: A városi környezet. Egyetemi jegyzet. Kossuth Egyetemi Kiadó, Debrecen, 2002
- [2.73] Gulyás Á.–Kiss T.: Városi élőhelyek és élőlények. In: Mezősi G. (ed.) Városökológia. JATE-Press, Szeged, 2007, 119–147.
- [2.74] Gulyás Á.–Lakatos L.–Süsmeghy Z.–Gál T.: Spatial Distribution of the Phenological Phases and Urban Heat Island in the Cases of Two Hungarian Cities. In: Klysik, K., T. R. Oke, K. Fortuniak, C. S. B. Grimmond, J. Wibig (ed.) Proceed. Fifth Int. Conf. on Urban Climate. Vol. 1. University of Lodz, Lodz, Poland, 2003, 39–42.
- [2.75] Gulyás Á.–Lakatos L.–Süsmeghy Z.–Gál T.: Connection between the Phenological Phases and Urban Heat Island in Debrecen and Szeged, Hungary. *Acta Climatologica et Chorologica Universitas Szegediensis*, 2003, Tom. 36–37, 79–83.
- [2.76] Szegedi, S.–Tóth, T.–Kapocska, L.–Gyarmati, R.: Examinations on the factors of urban heat island development in small and medium-sized towns in Hungary Carpathian. *Journal of Earth and Environmental Sciences*, 2013, Vol. 8, Nr 2.
- [2.77] Gajzágó L.: Mikroklimák városi környezetben. Első városklíma munkaértekezlet. OMSZ, Budapest, 1998, 25–30.
- [2.78] Orlanski, I.: A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1975, 56, 527–530.
- [2.79] Oke, T. R.: Boundary Layer Climates. Routledge, London–New York, 1987

- [2.80] Kerényi A.: Általános környezetvédelem. Mozaik, Szeged, 1995
- [2.81] Justyák J.-Tőkei L.-Szegedi S.: Terepklimatológia. Egyetemi jegyzet. Kossuth Egyetemi Könyvkiadó, Debrecen, 2003
- [2.82] Landsberg, H. E.: City climate. In: World Survey of Climatology, General Climatology 3. Amsterdam–New York–Oxford, 1981, 299–344.
- [2.83] Szegedi S.–Kircsi A.: The Development of the Urban Heat Island under Various Weather Conditions in Debrecen, Hungary. In: Klysik. K., T. R. Oke, K. Fortuniak, C. S. B. Grimmond, J. Wibig (ed.) Proceed. Fifth Int. Conf. on Urban Climate. Vol. 1. University of Lodz, ICUC-5, Lodz, Poland, 2006, pp.139–142.
- [2.84] Berényi D.: A városi háztömbök hatása az éjjeli lehűlésekre. *Időjárás*, 1930, 34, 46–49.
- [2.85] Oke, T. R.: Urban climates and global environmental change. In: Thompson, R. D. and Perry, A. (eds) Applied climatology. Routledge, London–New York, 1997, 273–287.
- [2.86] Kircsi, A.–Szegedi, S.: Temperature profiles in Dbrecen, Hungary. In: Klysik. K., T. R. Oke, K. Fortuniak, C. S. B. Grimmond, J. Wibig (ed.) Proceed. ICUC-5, Lodz, Poland, 2003, Vol. 1, 79–82.
- [2.87] Oke, T. R.: City size and the urban heat island. *Atm. Env.*, 1973, 7, 769–779.
- [2.88] Feng, J. Z.–Petzold, D. E.: Temperature Trends through Urbanization in Metropolitan Washington, D. C., 1945–1979. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 1988, Vol. 38, 4, 195–201.
- [2.89] Unger, J.–Bottyán Z.–Sümegehy, Z.–Gulyás A.: Connection between urban heat island and surface parameters: measurements and modeling. *Időjárás*, 2004, 108, 173–194.
- [2.90] Lakatos, M.–Szentimrey, T.–Bihari, Z.–Szalai, S.: Creation of a homogenized climate database for the Carpathian region by applying the MASH procedure and the preliminary analysis of the data. *Időjárás*, 2013, Vol. 117, 1, 143–158.
- [2.91] Lee, S.-H.–Baik, J.-J.: Statistical and dynamical characteristics of the urban heat island intensity in Seoul. *Theor. Appl. Climatol.*, 2010, 100, 227–237.
- [2.92] Yule, G. U.–Kendall M. G.: An introduction to the theory of statistics. Fourteenth edition, revised and Enlarged. Charles Griffin & Company, London, 1950
- [2.93] Sneyers, S.: On the statistical analysis of series of observations; Technical note no. 5 143, WMO No 725 415, Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva, 1990
- [2.94] Ward, J. E.–Wendell, R. E.: A new norm for measuring distance which yields linear location models. *Operations Research*, 1980, 28, 836–844.
- [2.95] Wayne, T. W.: Change-point analysis: a powerful new tool for detecting changes. 2000. <http://www.variation.com/cpa/tech/changepoint.html>. Submitted to Quality Engineering.

